

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

**ARCO ELÉTRICO E ENERGIA INCIDENTE EM
SISTEMAS ELÉTRICOS INDUSTRIAIS**

EDSON FERNANDO MACHADO SATO

ITAJUBÁ

2022

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

Edson Fernando Machado Sato

ARCO ELÉTRICO E ENERGIA INCIDENTE EM SISTEMAS ELÉTRICOS INDUSTRIAIS

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

Itajubá – MG
Outubro de 2022



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO



QUADRO DEMONSTRATIVO DE APURAÇÃO

*Defesa de Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica
(Traslado)*

Título do trabalho: “Arco Elétrico e Energia Incidente em Sistemas Elétricos Industriais”

Autor: Edson Fernando Machado Sato

JULGAMENTO DOS EXAMINADORES

Examinador	Nome Completo	Conceito
1º	Prof. Dr. Luís Henrique Lopes Lima <i>Convidado (UFJF)</i>	A
2º	Prof. Dr. Paulo Márcio da Silveira <i>Convidado (UNIFEI)</i>	A
3º	Prof. Dr. José Maria de Carvalho Filho <i>Orientador e Presidente de Banca (UNIFEI)</i>	A

Conforme Art. 55, da Norma de Programas de Pós-Graduação da Universidade Federal de Itajubá:

- (1) Para considerar o trabalho aprovado, deve ser atribuído o conceito “A – Aprovado”;
- (2) Para considerar o trabalho reprovado, deve ser atribuído o conceito “R – Reprovado”.

Conceito final: A – APROVADO

Itajubá, 11 de outubro de 2022.

Assinado digitalmente via SIPAC/UNIFEI

Para verificar a autenticidade deste documento entre em <https://sipac.unifei.edu.br/documentos/> informando seu número: 50, ano: 2022, tipo: ATA, data de emissão: 13/10/2022 e o código de verificação: 913c56883a.

Para Patrícia, minha inspiradora e incentivadora.

AGRADECIMENTOS

À Petrobras, empresa orgulhosamente brasileira e incentivadora da boa Engenharia, pelo apoio institucional à minha participação no Curso de Especialização em Proteção de Sistemas Elétricos (CEPSE 2019), que abriu as portas para este projeto de mestrado.

Ao professor José Maria de Carvalho Filho, orientador deste trabalho, pela confiança e estímulo em buscar o conhecimento que está aqui retratado.

Aos professores Luís Henrique Lopes Lima (UFJF), Paulo Márcio da Silveira (UNIFEI), Frederico Oliveira Passos (UNIFEI) e Thiago Clé Oliveira (UNIFEI), pela presteza em dedicar seu tempo para avaliar o trabalho e compartilhar seu conhecimento para melhoria desta dissertação.

Ao engenheiro Eduardo Delmondes Grava (Furnas), colega de mestrado, pela leitura do manuscrito e contribuições para o texto.

À Eliara Passos, colaboradora do QmaP, pelo seu costumeiro apoio administrativo, ainda mais valioso em tempos de pandemia.

NÃO BASTA abrir a janela
Para ver os campos e o rio.
Não é bastante não ser cego
Para ver as árvores e flores.
20.4.1919 Alberto Caeiro

RESUMO

Embora a utilização em larga escala da eletricidade na indústria tenha se iniciado no final do Século XIX, o primeiro método para estimar os efeitos térmicos do arco elétrico só foi proposto nos anos 80. Nas décadas seguintes, vários trabalhos contribuíram para o aumento do conhecimento sobre o fenômeno e para a melhoria dos métodos para quantificá-lo. Em 2002, foi publicada a primeira edição da IEEE Std 1584, sendo a primeira norma técnica dedicada ao cálculo de energia incidente. Esta norma, que se tornou o método mais popular na indústria, teve sua segunda edição publicada no final de 2018, com mudanças significativas. Um novo modelo matemático foi proposto, incluindo parâmetros que antes não eram avaliados, além de extensas equações, cujo cálculo manual pode ser considerado impraticável. Neste contexto, este trabalho apresenta o desenvolvimento de um script de cálculo da energia incidente pelo método IEEE Std 1584-2018 e sua aplicação em dois estudos de caso. O primeiro estudo de caso ilustra o levantamento dos parâmetros necessários para executar um estudo de energia incidente de um conjunto de manobra e comando de baixa tensão, finalizando com uma comparação entre os resultados da Edição 2018 com os da Edição 2002 da norma. O segundo estudo de caso propõe um roteiro para a realização de um estudo dinâmico de energia incidente que considera múltiplas fontes e o decremento CA da contribuição de curto-circuito de máquinas rotativas, concluindo com uma comparação entre os resultados considerando o decremento CA com os resultados em que ele é desprezado, e uma discussão sobre as situações em que o esforço para a realização de um estudo dinâmico pode se justificar.

Palavras-chave: arco elétrico; energia incidente; decremento CA; IEEE Std 1584-2018.

ABSTRACT

Although the massive use of electricity in industry began at the end of the 19th century, the first electric arc thermal effects estimating method was only proposed in the 1980s. In the following decades, several works contributed to increase the knowledge about the phenomenon and to improve the methods to quantify it. The IEEE Std 1584 first edition was published in 2002, being the first incident energy calculation dedicated technical standard. This standard, which has become the industry most popular method, had its second edition published at the end of 2018, with significant changes. A new mathematical model was proposed, including parameters that were not measured before, in addition to long equations, which manual calculation may be considered impractical. In this context, this work presents an IEEE Std 1584-2018 method incident energy calculation script development and its application in two case studies. The first case study illustrates the parameter evaluation to carry out a low voltage controlgear incident energy study, ending with a comparison between the 2018 Edition results with those of the 2002 Edition. The second case study proposes a roadmap for carrying out an incident energy dynamic study that considers multiple sources and the rotating machines short-circuit contribution *ac* decrement, concluding with a comparison between the results considering the *ac* decrement with the results in which it is neglected, and a discussion of the situations in which the effort to carry out a dynamic study can be justified.

Keywords: arc flash; incident energy; *ac* decrement; IEEE Std 1584-2018.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Representação da delimitação do estudo dentro do tema “arco elétrico”.....	20
Figura 2.1 – Linha do tempo com marcos da evolução dos estudos sobre o arco elétrico.....	31
Figura 3.1 – Etapas do processo de gestão do risco de arco elétrico – Adaptado de [21].....	32
Figura 3.2 – Exemplos de conjunto de manobra e comando tipo CDC e CCM.....	33
Figura 3.3 – Exemplo de esquema de seletividade cronométrica.....	45
Figura 3.4 – Exemplo de esquema de seletividade lógica.....	46
Figura 3.5 – Exemplo de esquema com perda temporária de seletividade.....	47
Figura 3.6 – Exemplo de esquema com relé diferencial de barras.....	48
Figura 3.7 – Exemplo de esquema com relé de arco.....	49
Figura 3.8 – Etapas da operação de um AQD.....	50
Figura 3.9 – Comparativo entre métodos de redução de duração de arco (gráfico).....	53
Figura 4.1 – Etapas de um estudo de energia incidente.....	54
Figura 4.2 – Representação conceitual método IEEE Std 1584-2018.....	55
Figura 4.3 – Fluxograma do método IEEE Std 1584-2018.....	56
Figura 4.4 – Configurações de eletrodo.....	59
Figura 4.5 – Influência da disposição de eletrodo e do invólucro.....	61
Figura 5.1 – Script: Diagrama de blocos.....	74
Figura 5.2 – Script: Função <i>checkdata</i> com dados inválidos.....	76
Figura 5.3 – Script: Função <i>checkdata</i> com dados válidos.....	76
Figura 5.4 – Modo de utilização: Planilha de entrada de dados.....	78
Figura 5.5 – Modo de utilização: Planilha com as correntes de arco.....	79
Figura 5.6 – Modo de utilização: Planilha com as durações de arco.....	79
Figura 5.7 – Modo de utilização: Planilha com resultados.....	80
Figura 5.8 – Validação 1: Dados de entrada (Anexo D da IEEE Std 1584-2018).....	80
Figura 5.9 – Validação 1: Resultados com I_{arcmax} (script).....	80
Figura 5.10 – Validação 1: Resultados com I_{arcmin} (script).....	81
Figura 5.11 – ArcAdvisor: Página inicial.....	82
Figura 5.12 – Validação 2: Dados de entrada (ArcAdvisor).....	82
Figura 5.13 – Validação 2: Resultados com I_{arcmax} (script).....	83
Figura 5.14 – Validação 2: Resultados com I_{arcmin} (script).....	84
Figura 5.15 – Validação 3: Resultados do exemplo numérico publicado por Das [43].....	85
Figura 5.16 – Validação 3: Resultados pelo script.....	85
Figura 6.1 – Influência da configuração de eletrodo na energia incidente.....	88
Figura 6.2 – Influência da duração de arco na energia incidente.....	89
Figura 6.3 – Influência da distância de trabalho na energia incidente.....	90
Figura 6.4 – Influência do tamanho do invólucro (abertura) na energia incidente.....	91
Figura 6.5 – Influência do espaçamento entre eletrodos na energia incidente.....	91

Figura 6.6 – Influência da tensão ($0,208 \leq V_{oc} \leq 0,6$ kV) na variação de corrente de arco.....	92
Figura 6.7 – Influência da tensão ($0,6 < V_{oc} \leq 15$ kV) na variação de corrente de arco.....	92
Figura 7.1 – PN-02: Conjunto de manobra e comando do estudo de caso.....	94
Figura 7.2 – PN-02: Diagrama unifilar simplificado.....	95
Figura 7.3 – PN-02: Determinação dos compartimentos a serem avaliados.	96
Figura 7.4 – PN-02: Determinação das configurações de eletrodo.	97
Figura 7.5 – PN-02: Determinação do espaçamento entre eletrodos.	98
Figura 7.6 – PN-02: Determinação das dimensões do invólucro.	99
Figura 7.7 – PN-02: Determinação dos modos de operação.	100
Figura 7.8 – PN-02: Diagrama unifilar com o esquema de proteção.	101
Figura 7.9 – PN-02: Determinação da distância de trabalho.	105
Figura 7.10 – Fluxograma de execução do script para o Estudo de Caso 1.	105
Figura 7.11 – PN-02: Dados de entrada.	106
Figura 7.12 – PN-02: Correntes de arco.	106
Figura 7.13 – PN-02: Durações de arco.	107
Figura 7.14 – PN-02: Resultado final – Pior caso.	107
Figura 8.1 – Contribuições simétricas típicas de vários tipos de fontes – Adaptado de [30].	111
Figura 8.2 – Perfis das contribuições de curto-circuito totais – Adaptado de [43].	113
Figura 8.3 – Tela de opções do módulo <i>Arc Flash</i> do PTW.	114
Figura 8.4 – Exemplo proposto por Das [43].	115
Figura 8.5 – Análise da segmentação de uma corrente constante.	116
Figura 8.6 – Relação I_{arc}/I_{bf} para diferentes valores de I_{bf} [1].	117
Figura 8.7 – I_{arc} em função de I_{bf} , para tensões de 13.800, 4.160 e 480 V.....	117
Figura 8.8 – Corrente com decaimento e Corrente média equivalente.	118
Figura 8.9 – Comparação entre a resolução pela corrente total e por superposição.....	119
Figura 9.1 – Opções de escolha do passo de simulação.	123
Figura 9.2 – Curvas de decremento dos geradores – Gerada a partir dos parâmetros.....	126
Figura 9.3 – Valores típicos de X/R de motores de indução trifásicos a 60 Hz [45].	127
Figura 9.4 – Decremento CA típico de motores de indução trifásicos ($I_p/I_{nom} = 6$).	128
Figura 9.5 – Fluxograma de execução do script para o Estudo de Caso 2.	129
Figura 9.6 – PN-01A: Diagrama unifilar geral.....	130
Figura 9.7 – PN-01A: I_{bf} total (sem atuação da proteção).....	131
Figura 9.8 – PN-01A: I_{arc} total (máxima e mínima).	131
Figura 9.9 – PN-01A: Decomposição de I_{arc} total (máxima e mínima).....	132
Figura 9.10 – PN-01A: Verificação gráfica do tempo de operação da proteção do Gerador.	133
Figura 9.11 – PN-01A: I_{bf} total (considerando atuação da proteção).	134
Figura 9.12 – PN-01A: Resultado de energia incidente (E).	135
Figura 9.13 – Algoritmo sugerido para cálculo de AFB	136
Figura 9.14 – PN-01A: Aplicação do método proposto por Das.....	137
Figura 9.15 – Diferença na contribuição de curto-circuito com e sem decremento CA.	140

LISTA DE QUADROS

Quadro 3.1 – Estimativa da probabilidade de arco elétrico.....	34
Quadro 3.2 – Métodos para cálculo de energia incidente.....	35
Quadro 3.3 – Referências para conjunto de manobra e comando à prova de arco.....	40
Quadro 3.4 – Categorias de EPI conforme NFPA 70E-2021.....	42
Quadro 3.5 – Métodos de avaliação de severidade vs. métodos de seleção de EPI.	43
Quadro 3.6 – Características de alguns AQDs comerciais.....	51
Quadro 3.7 – Comparação entre métodos de redução de duração de arco.....	52
Quadro 4.1 – Espaçamento entre eletrodos típico por classe de equipamento.....	62
Quadro 4.2 – Dimensões de invólucro típicas por classe de equipamento.....	63
Quadro 4.3 – Distância de trabalho típica por classe de equipamento.	63
Quadro 4.4 – Coeficientes para a Equação (4.1).	64
Quadro 4.5 – Coeficientes para a Equação (4.6).	66
Quadro 4.6 – Coeficientes para as Equações (4.8) e (4.9).....	68
Quadro 4.7 – Coeficientes para as Equações (4.10), (4.13), (4.17) e (4.20).	70
Quadro 4.8 – Coeficientes para as Equações (4.11) e (4.18).....	70
Quadro 4.9 – Coeficientes para as Equações (4.12) e (4.19).....	70
Quadro 5.1 – Relação de arquivos.....	75
Quadro 5.2 – Modo de utilização: Descrição dos dados de entrada.....	78
Quadro 5.3 – Validação 1: Resultados com I_{arcmax} (Anexo D da IEEE Std 1584-2018).	80
Quadro 5.4 – Validação 1: Resultados com I_{arcmin} (Anexo D da IEEE Std 1584-2018).	81
Quadro 5.5 – Validação 2: Resultados com I_{arcmax} (ArcAdvisor).....	83
Quadro 5.6 – Validação 2: Resultados com I_{arcmin} (ArcAdvisor).	84
Quadro 7.1 – PN-02: Dimensões dos invólucros.	99
Quadro 7.2 – PN-02: Cenários de falha (completo).	103
Quadro 7.3 – PN-02: Cenários de falha (para cálculo).....	104
Quadro 7.4 – PN-02: Determinação da duração de arco para o cenário “a”.	107
Quadro 7.5 – PN-02: Comparativo IEEE Std 1584-2002 vs. IEEE Std 1584-2018.....	108
Quadro 8.1 – Análise da segmentação de uma corrente constante.....	116
Quadro 8.2 – Comparação entre a resolução pela corrente total e por superposição.	119
Quadro 9.1 – Parâmetros dos geradores síncronos.....	126
Quadro 9.2 – Valores típicos de T_d'' de acordo com a faixa de potência.	128
Quadro 9.3 – Determinação das durações reais das contribuições.....	134
Quadro 9.4 – Resultados.....	137
Quadro 9.5 – Comparação de resultados entre o método proposto e o método de Das.	138
Quadro 9.6 – Comparação de características entre o método proposto e o método de Das... 138	
Quadro 9.7 – Comparação entre cálculos com e sem considerar o decremento CA.....	139

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AFD	<i>Arc-Flash Detection</i> – detecção de arco (dispositivo ou função)
AI	<i>Artificial Intelligence</i> – inteligência artificial
ANSI	American National Standards Institute (entidade norte-americana)
AQD	<i>Arc Quenching Device</i> – dispositivo de extinção de arco
ASTM	American Society for Testing and Materials (entidade internacional)
CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
CCM	Centro de Comando de Motores
CDC	Centro de Distribuição de Cargas
DCS	<i>Distributed Control Systems</i> – sistema de controle distribuído
<i>e.g.</i>	<i>exempli gratia</i> (“por exemplo”, em latim)
EPI	Equipamento de Proteção Individual
<i>et al.</i>	<i>et alia</i> (“e outros”, em latim)
GOOSE	<i>Generic Object Oriented Substation Event</i> (Norma IEC 61850)
<i>i.e.</i>	<i>id est</i> (“isto é”, em latim)
IAC	<i>Internal Arc Classified</i> – classificação de arco interno
IEC	International Electrotechnical Commission (entidade internacional)
IED	<i>Intelligent Electronic Device</i> – dispositivo eletrônico inteligente
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers (entidade norte-americana)
IoT	<i>Internet of Things</i> – internet das coisas
NFPA	National Fire Protection Association (entidade norte-americana)
OMC	Organização Mundial do Comércio (entidade internacional)
OSHA	Occupational Safety and Health Administration (entidade norte-americana)
PCB	<i>Power Circuit Breaker</i> – disjuntor de potência ou aberto
PTTA	<i>Partially Type-Tested Assemblies</i> – conjuntos parcialmente testados com ensaio de tipo – termo obsoleto
RRS	<i>Remote Racking System</i> – sistema de inserção/extração remota
SI	Sistema Internacional de Unidades
SSO	Saúde e Segurança Ocupacional
TC	Transformador de Corrente
TP	Transformador de Potencial
TTA	<i>Type-Tested Assemblies</i> – conjuntos totalmente testados com ensaio de tipo – termo obsoleto
<i>vs.</i>	<i>versus</i> (“contra”, em latim)

LISTA DE SÍMBOLOS

AFB	<i>Arc-Flash Boundary</i> – Limite de Aproximação Segura (<i>LAS</i>)
$AFB_{I_{arcmax}}$	Limite de Aproximação Segura calculado com I_{arcmax} e $T_{I_{arcmax}}$
$AFB_{I_{arcmin}}$	Limite de Aproximação Segura calculado com I_{arcmin} e $T_{I_{arcmin}}$
$ATPV$	<i>Arc Thermal Performance Value</i> – valor de desempenho térmico ao arco
CF	<i>Enclosure Size Correction Factor</i> – fator de correção do tamanho do invólucro
D	<i>Working Distance</i> – distância de trabalho
$Depth$	Profundidade do invólucro
E	<i>Incident Energy</i> – energia incidente
$E_{I_{arcmax}}$	Energia Incidente calculada com I_{arcmax} e $T_{I_{arcmax}}$
$E_{I_{arcmin}}$	Energia Incidente calculada com I_{arcmin} e $T_{I_{arcmin}}$
E	Tensão interna da máquina, antes da falta
E'	Tensão interna da máquina, à montante da reatância transitória
E''	Tensão interna da máquina, à montante da reatância subtransitória
$E.C.$	<i>Electrode Configuration</i> – configuração de eletrodo
E_{BT}	<i>Breakopen Threshold Energy</i> – limite de energia de ruptura
EES	<i>Equivalent Enclosure Size</i> – tamanho de invólucro equivalente
G	<i>Gap between conductors</i> – espaçamento entre eletrodos
HCB	<i>Horizontal conductors/electrodes inside a Cubic Box</i> – condutores/eletrodos horizontais dentro de invólucro metálico
$Height$	Altura do invólucro
HOA	<i>Horizontal conductors/electrodes in Open Air</i> – condutores/eletrodos horizontais ao ar livre
\bar{I}	Corrente média
i_{ac}	Magnitude da componente alternada da contribuição de curto-circuito
I_{arc}	<i>Arcing Fault Current</i> – corrente de falta sob arco elétrico
I_{arcmax}	Corrente de arco máxima ou 100%
I_{arcmin}	Corrente de arco mínima ou reduzida
I_{bf}	<i>Bolted Fault Current (rms symmetrical)</i> – corrente de falta franca (eficaz simétrica)
i_d	Corrente de curto-circuito de regime permanente
i_d'	Corrente transitória
i_d''	Corrente subtransitória
i_F	Corrente de campo à plena carga
i_{Fg}	Corrente de campo a vazio
I_{med}	Corrente de curto-circuito média no segmento (Método de Das)
I_{sym}	Corrente de falta franca eficaz simétrica calculada pelo PTW

LAS	Limite de Aproximação Segura (o mesmo que AFB)
t	Tempo ou duração
T_{arc}	<i>Arc Duration</i> – duração de arco
T_{arcmax}	Duração de arco obtida pela ação de I_{arcmax}
T_{arcmin}	Duração de arco obtida pela ação de I_{arcmin}
T_d'	Constante de tempo transitória
T_d''	Constante de tempo subtransitória
V_a	Tensão nos terminais da máquina, antes da falta
V_{oc}	<i>Open-Circuit Voltage</i> (“tensão de circuito aberto”)
$VarC_f$	<i>Arcing Current Variation Correction Factor</i> – fator de variação de corrente de arco
VCB	<i>Vertical conductors/electrodes inside a Cubic Box</i> – condutores/eletrodos verticais dentro de invólucro metálico
VCBB	<i>Vertical conductors/electrodes terminated in na insulating Barrier inside a Cubic Box</i> – condutores/eletrodos verticais terminados em barreira isolante dentro de invólucro metálico
VOA	<i>Vertical conductors/electrodes in Open Air</i> – condutores/eletrodos verticais ao ar livre
<i>Width</i>	Largura do invólucro
X_d	Reatância síncrona de eixo direto
X_d'	Reatância transitória de eixo direto
X_d''	Reatância subtransitória de eixo direto
X_{lr}	Reatância de rotor bloqueado de motores de indução
Δt	Intervalo de tempo
ϕ	Ângulo do fator de potência, antes da falta

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	19
1.1	Motivações e propósitos	19
1.2	Delimitação do trabalho	20
1.3	Estrutura da dissertação	21
2	O ARCO ELÉTRICO COMO PERIGO	22
2.1	Considerações iniciais.....	22
2.2	Os diversos contextos do arco elétrico.....	22
2.3	Os efeitos nocivos do arco elétrico	23
2.4	As causas iniciadoras do arco elétrico	23
2.5	A evolução do conhecimento sobre o arco elétrico	24
2.5.1	Os primeiros estudos	24
2.5.2	O método de Lee (1982).....	25
2.5.3	O método de Doughty, <i>et al.</i> (1998).....	25
2.5.4	O método IEEE Std 1584-2002	26
2.5.5	O método IEEE Std 1584-2018.....	27
2.6	Normatização sobre o arco elétrico.....	27
2.6.1	Normatização internacional.....	27
2.6.2	Normatização nacional	28
2.7	Considerações finais	30
3	GESTÃO DO RISCO DE ARCO ELÉTRICO	32
3.1	Considerações iniciais.....	32
3.2	Identificação das fontes de perigo.....	32
3.3	Análise de riscos da intervenção.....	34
3.3.1	Definição de risco	34
3.3.2	Estimativa da probabilidade de ocorrência de um arco elétrico	34
3.3.3	Estimativa da severidade dos efeitos de um arco elétrico	35
3.4	Controle do risco de arco elétrico	36
3.4.1	Estratégia geral	36
3.4.2	Medidas baseadas na prevenção da ocorrência	37
3.4.2.1	Treinamento	37
3.4.2.2	Manutenção preventiva.....	37
3.4.2.3	Manutenção preditiva	37
3.4.2.4	Intertravamento.....	38
3.4.3	Medidas baseadas na mitigação de danos – Medidas passivas	38
3.4.3.1	Operação remota.....	38
3.4.3.2	Conjunto de manobra e comando classificado para arco interno	40
3.4.3.3	Equipamento de proteção individual (EPI).....	42
3.4.4	Medidas baseadas na mitigação de danos – Medidas ativas	44
3.4.4.1	Redução da corrente de arco	44

3.4.4.2	Redução da duração de arco – Redução do tempo de operação da proteção ..44	
3.4.4.3	Redução da duração de arco – Extinção de arco50	
3.4.4.4	Comparativo entre medidas para redução da duração de arco52	
3.5	Considerações finais53	
4	O MÉTODO IEEE STD 1584-2018	54
4.1	Considerações iniciais.....54	
4.2	Visão geral do método54	
4.3	Discussão sobre os principais parâmetros.....58	
4.3.1	Dados de entrada58	
4.3.1.1	Tensão de circuito aberto (V_{oc})58	
4.3.1.2	Corrente de falta franca (I_{bf})58	
4.3.1.3	Configuração de eletrodo ($E.C.$).....59	
4.3.1.4	Espaçamento entre eletrodos (G).....62	
4.3.1.5	Dimensões do invólucro ($Height \times Width \times Depth$).....62	
4.3.1.6	Distância de trabalho (D).....63	
4.3.2	Parâmetros intermediários – Calculados64	
4.3.2.1	Corrente de arco (I_{arc}).....64	
4.3.2.2	Fator de correção de variação de corrente de arco ($VarC_f$)66	
4.3.2.3	Duração de arco (T_{arc})67	
4.3.2.4	Correção do tamanho do invólucro (CF).....68	
4.3.3	Dados de saída – Resultados69	
4.3.3.1	Energia incidente (E)69	
4.3.3.2	Limite de aproximação segura (AFB).....71	
4.4	Considerações finais73	
5	DESENVOLVIMENTO DE SCRIPT DE CÁLCULO	74
5.1	Considerações iniciais.....74	
5.2	Visão geral do script74	
5.3	Principais funções75	
5.3.1	Função <i>checkdata</i>75	
5.3.2	Função <i>intercurrent</i> , <i>interenergy</i> e <i>interboundary</i>77	
5.3.3	Função <i>finalvalues</i>77	
5.3.4	Função <i>enclosurecf</i>77	
5.3.5	Função <i>currentvarcf</i>77	
5.4	Modo de utilização.....78	
5.4.1	1ª etapa: Preparação dos dados de entrada78	
5.4.2	2ª etapa: Inicialização do script e cálculo da corrente de arco78	
5.4.3	3ª etapa: Interação com o Estudo de Seletividade da Proteção79	
5.4.4	4ª etapa: Resultados e encerramento79	
5.5	Validação numérica80	
5.5.1	Comparação com o exemplo do Anexo D da IEEE Std 1584-2018.....80	
5.5.2	Comparação com o software online ArcAdvisor81	
5.5.3	Comparação com o exemplo publicado por Das85	
5.6	Considerações finais86	

6	ANÁLISES DE SENSIBILIDADE	87
6.1	Considerações iniciais.....	87
6.2	Análises realizadas.....	87
6.2.1	Influência da configuração de eletrodo	87
6.2.2	Influência da duração de arco	89
6.2.3	Influência da distância de trabalho	89
6.2.4	Influência do tamanho do invólucro	90
6.2.5	Influência do espaçamento entre eletrodos.....	91
6.2.6	Influência da tensão na variação da corrente de arco	92
6.3	Considerações finais	93
7	ESTUDO DE CASO 1 – CORRENTE CONSTANTE	94
7.1	Considerações iniciais.....	94
7.2	Apresentação do sistema.....	94
7.3	Levantamento de dados.....	96
7.3.1	Dados mecânicos e construtivos.....	96
7.3.1.1	Determinação dos compartimentos a serem avaliados	96
7.3.1.2	Determinação da configuração de eletrodo (<i>E.C.</i>).....	97
7.3.1.3	Determinação do espaçamento entre eletrodos (<i>G</i>).....	98
7.3.1.4	Determinação das dimensões do invólucro (<i>Height</i> × <i>Width</i> × <i>Depth</i>).....	99
7.3.2	Dados elétricos e operacionais	100
7.3.2.1	Determinação da corrente de curto-circuito franca (<i>I_{bf}</i>)	100
7.3.2.2	Determinação dos modos de operação	100
7.3.2.3	Determinação dos cenários de falha	101
7.3.2.4	Determinação da distância de trabalho	104
7.4	Cálculos de energia incidente	105
7.4.1	Fluxograma de execução do script	105
7.4.2	Passo-a-passo.....	106
7.4.2.1	Passo 1: Preparar dados de entrada.....	106
7.4.2.2	Passo 2: Calcular <i>I_{arc}</i>	106
7.4.2.3	Passo 3: Determinar durações de arco	106
7.4.2.4	Passo 4: Calcular <i>E</i> e <i>AFB</i>	107
7.5	Análise dos resultados.....	107
7.6	Considerações finais	109
8	DECREMENTO CA APLICADO AO ESTUDO DE ENERGIA INCIDENTE	110
8.1	Considerações iniciais.....	110
8.2	Revisão da literatura	110
8.2.1	Tipos de fontes de curto-circuito e o seu decremento CA.....	110
8.2.2	Cálculo de energia incidente considerando o decremento CA	112
8.3	Aplicabilidade de técnicas de análise de circuitos.....	115
8.3.1	Segmentação da corrente de falta franca	115
8.3.2	Valor médio de uma corrente variável	117
8.3.3	Superposição de fontes	118
8.4	Considerações finais	120

9	ESTUDO DE CASO 2 – DECREMENTO CA	121
9.1	Considerações iniciais.....	121
9.2	Apresentação do sistema.....	121
9.3	Levantamento de dados.....	122
9.3.1	Dados gerais	122
9.3.2	Dados específicos para o estudo dinâmico	123
9.3.2.1	Premissas adotadas	123
9.3.2.2	Curvas de decremento CA dos geradores.....	124
9.3.2.3	Curvas de decremento CA dos motores de indução	127
9.4	Cálculos de energia incidente	129
9.4.1	Fluxograma de execução do script	129
9.4.2	Passo-a-passo.....	130
9.4.2.1	Passo 1: Determinar I_{bf} total (sem atuação da proteção)	130
9.4.2.2	Passo 2: Calcular I_{arc} total	131
9.4.2.3	Passo 3: Decompor I_{arc} total.....	132
9.4.2.4	Passo 4: Determinar a duração de cada contribuição	132
9.4.2.5	Passo 5: Determinar I_{bf} total (considerando atuação da proteção).....	134
9.4.2.6	Passo 6: Calcular E	135
9.4.2.7	Passo 7: Calcular AFB	135
9.5	Análise dos resultados.....	136
9.5.1	Resultados consolidados.....	136
9.5.2	Comparação com o método proposto por Das.....	137
9.5.3	Comparação com o cálculo sem considerar o decremento CA	139
9.6	Considerações finais	140
10	CONCLUSÃO	141
10.1	Considerações finais sobre a dissertação	141
10.2	Sugestões para trabalhos futuros.....	142
10.3	Artigos publicados e submetidos	142
	REFERÊNCIAS	143
	ANEXO A – Tabelas da NFPA 70E-2021	146
A.1	Tabela 130.5(C)	146
A.2	Tabela 130.7(C)(15)(a)	148
A.3	Tabela 130.7(C)(15)(b).....	149
	ANEXO B – Código do script para MATLAB	150
B.1	Script principal: <i>IEEE1584_2018.m</i>	150
B.2	Função: <i>checkdata.m</i>	153
B.3	Função: <i>intercurrent.m</i>	155
B.4	Função: <i>interenergy.m</i>	156
B.5	Função: <i>interboundary.m</i>	157
B.6	Função: <i>finalvalues.m</i>	158
B.7	Função: <i>enclosurecf.m</i>	159
B.8	Função: <i>currentvarcf.m</i>	160

ANEXO C – Dados do Estudo de Caso 2	161
C.1 Especificação dos equipamentos (diagrama unifilar)	161
C.2 Estudo de curto-circuito (diagrama unifilar).....	162
C.3 Curva de decréscimo CA do TURBO-EXPANSOR.....	163
C.4 Curva de decréscimo CA da TURBINA-GAS.....	164
C.5 PN-01A: Curvas de I_{bf} e I_{arc}	165
C.6 PN-01B: Curvas de I_{bf} e I_{arc}	166
C.7 PN-02A: Curvas de I_{bf} e I_{arc}	167
C.8 PN-02B: Curvas de I_{bf} e I_{arc}	168
C.9 PN-03A: Curvas de I_{bf} e I_{arc}	169
C.10 PN-03B: Curvas de I_{bf} e I_{arc}	170
C.11 PN-04A: Curvas de I_{bf} e I_{arc}	171
C.12 PN-04B: Curvas de I_{bf} e I_{arc}	172
C.13 PN-05A: Curvas de I_{bf} e I_{arc}	173
C.14 PN-05B: Curvas de I_{bf} e I_{arc}	174

1 INTRODUÇÃO

1.1 Motivações e propósitos

No final de 2018, foi publicada a segunda edição da norma norte-americana IEEE Std 1584 – *IEEE Guide for Performing Arc-Flash Hazard Calculations*¹ [1], em substituição à edição de 2002 [2]. Esta nova edição introduziu um modelo matemático completamente novo para o cálculo de energia incidente. Presumivelmente mais acurado que o seu predecessor, este novo modelo, no entanto, tornou a execução de um estudo de energia incidente muito mais trabalhosa, em comparação com a primeira edição da norma, requerendo o levantamento de dados que antes não eram considerados, e demandando a solução de extensas equações, tornando necessário o uso de alguma ferramenta computacional especializada.

Além disso, o modelo matemático da IEEE Std 1584-2018 considera que a corrente de arco permanece constante ao longo de toda a duração de arco, premissa que não é sempre verdadeira. Alguns tipos de fontes fornecem uma corrente de curto-circuito simétrica eficaz que é máxima imediatamente após o início do evento, decaindo com o decorrer do tempo. Esta característica é conhecida como “decremento CA”², e influencia o valor da energia incidente, uma vez que a corrente de arco é dependente da corrente de falta franca. A norma alerta que este fenômeno deve ser levado em consideração em um estudo de energia incidente, contudo, não apresenta exemplos nem diretrizes de como se realizar esta simulação dinâmica. Também são poucos os exemplos na literatura, e os softwares comerciais, via de regra, não calculam a energia incidente considerando o decremento CA.

Motivado por este contexto, este trabalho se propôs a desenvolver:

- Um script de cálculo de energia incidente, baseado no método IEEE Std 1584-2018, em linguagem de programação com código aberto;
- Um estudo de caso “convencional”, *i.e.*, considerando a corrente de falta franca constante, ilustrando e discutindo passo-a-passo a aplicação do método;
- Um estudo de caso “dinâmico”, *i.e.*, considerando a corrente de falta franca com decremento CA, sugerindo um roteiro para a aplicação do método.

Além disso, e não menos importante, pode-se citar o propósito de contribuir para a cultura da segurança contra o arco elétrico, ampliando esta discussão na academia.

¹ “Guia IEEE para realizar cálculos do perigo arco elétrico” (tradução livre).

² CA: Corrente Alternada.

1.2 Delimitação do trabalho

O tema “Arco Elétrico” é abrangente, ele pode se referir às “aplicações” deste fenômeno na indústria, aos seus “efeitos indesejados” em equipamentos e aos seus “perigos” à segurança ocupacional, recapitulados no item 2.2.

Como perigo, o arco elétrico pode ter seus efeitos nocivos classificados em dois grupos: “*Arc Flash*”, que se refere à luz e ao calor, e “*Arc Blast*”, que diz respeito às ondas de pressão e ao ruído, conforme discutido no item 2.3.

Para quantificar os efeitos térmicos do arco elétrico em pessoas (*Arc Flash*), existem diversos métodos propostos na literatura. A maioria destes métodos foi desenvolvida para sistemas “CA” (corrente alternada), e poucos são aplicáveis a sistemas “CC”³ (corrente contínua). Um breve histórico dos métodos é descrito no item 2.5, e a relação dos métodos reconhecidos pela NFPA 70E-2021 [3] (“Ralph Lee”, “Doughty”, “IEEE Std 1584” e “Doan”) com suas respectivas faixas de aplicação é apresentada no tem 3.3.3.

Diante de um assunto tão amplo, faz-se necessário declarar os limites deste trabalho, cujo escopo inclui a revisão da literatura necessária para a contextualização e compreensão do tema, permitindo o adequado desenvolvimento do script de cálculo e dos estudos de caso mencionados no item 1.1. A Figura 1.1 ilustra este escopo, como desdobramento do tema Arco Elétrico.

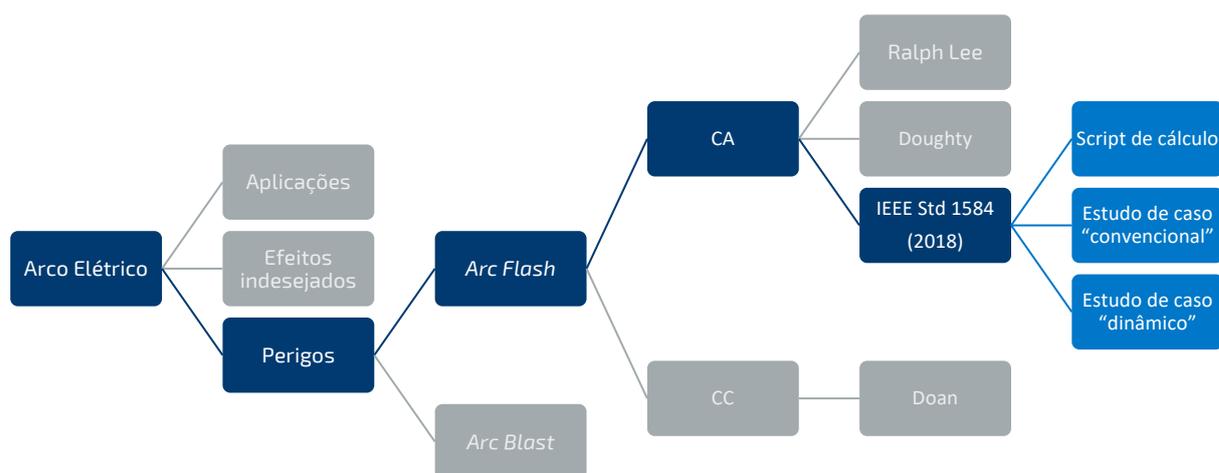


Figura 1.1 – Representação da delimitação do estudo dentro do tema “arco elétrico”.

³ CC: Corrente Contínua.

1.3 Estrutura da dissertação

A seguir, uma síntese dos capítulos:

- **Capítulo 1:** Apresentação das motivações e propósitos. Delimitação do trabalho. Estrutura da dissertação;
- **Capítulo 2:** Revisão da literatura, contextualizando o arco elétrico como fonte de perigo, seus efeitos e suas causas iniciadoras. Histórico com a evolução dos métodos de cálculo de energia incidente. Apresentação dos aspectos legais e normativos, nacionais e internacionais;
- **Capítulo 3:** Revisão da literatura acerca da gestão do risco de arco elétrico. Identificação das fontes de perigo, análise de riscos, e recapitulação das principais medidas de controle e soluções tecnológicas;
- **Capítulo 4:** Visão geral do método IEEE Std 1584-2018, com discussão dos parâmetros de interesse para este trabalho;
- **Capítulo 5:** Apresentação do script de cálculo desenvolvido. Descrição da rotina principal, das funções auxiliares e do modo de utilização. Validação do código;
- **Capítulo 6:** Aplicação do script em análises de sensibilidade de parâmetros do método IEEE Std 1584-2018;
- **Capítulo 7:** Estudo de caso “convencional”, considerando contribuições de curto-circuito constantes. Apresentação de um roteiro ilustrado, passo-a-passo;
- **Capítulo 8:** Revisão da literatura sobre o decremento CA. Avaliação das técnicas de análise de circuitos aplicáveis ao cálculo de energia incidente;
- **Capítulo 9:** Estudo de caso “dinâmico”, considerando contribuições de curto-circuito com decremento CA. Proposta de uma metodologia para o cálculo de energia incidente e para o limite de aproximação segura. Comparação com o Método de Das. Comparação com o estudo sem considerar o decremento CA;
- **Capítulo 10:** Conclusões gerais. Sugestões para trabalhos futuros. Relação de artigos derivados deste trabalho;
- **Referências:** Apresentadas na ordem em que foram citadas no texto;
- **Anexo A:** Tabelas da NFPA 70E-2021⁴;
- **Anexo B:** Código completo do script de cálculo desenvolvido;
- **Anexo C:** Dados complementares do estudo de caso do Capítulo 9.

⁴ A tabelas são apresentadas apenas para compreensão dos conceitos discutidos, com objetivo exclusivamente acadêmico. Para a aplicação das recomendações de segurança, a norma deve ser diretamente consultada.

2 O ARCO ELÉTRICO COMO PERIGO

2.1 Considerações iniciais

Este capítulo inicial tem como objetivo contextualizar o tema central desta dissertação, o arco elétrico, e apresentar a evolução histórica dos métodos desenvolvidos para quantificar os seus efeitos nocivos ao ser humano, desde os primeiros trabalhos independentes, disponíveis sob a forma de artigos na base de dados do IEEE⁵, até o método IEEE Std 1584-2018, que é o método mais atual e o utilizado como objeto de estudo deste trabalho. Ao final, é apresentada uma visão geral sobre a normatização internacional e nacional a respeito do arco elétrico, que expõe diferentes abordagens sobre o tema e serve de preâmbulo para o capítulo seguinte.

2.2 Os diversos contextos do arco elétrico

A descoberta do arco elétrico, no início do Século XIX [4], abriu as portas para uma série de desenvolvimentos científicos e aplicações técnicas. Uma das suas primeiras aplicações foi o uso em iluminação. Outros exemplos de aplicações importantes são a fundição e a soldagem a arco. São definidas como aplicações do arco elétrico as situações em que o seu emprego é intencional e controlado.

Por outro lado, o arco elétrico também ocorre em situações em que ele não é desejado. Talvez o exemplo mais comum de efeito indesejado do arco elétrico seja a ocorrência durante a abertura de circuitos indutivos, causando o desgaste de contatos de seccionadores, contadores e disjuntores. Neste caso, apesar de indesejada, a ocorrência do arco elétrico é esperada em condições normais, como característica intrínseca da operação desses equipamentos.

Há ainda as situações em que o arco elétrico, além de indesejado, é provocado pela falha do sistema de isolamento entre dois pontos energizados, podendo esta falha ser causada por motivos diversos. Diferentemente do curto-circuito, cujos danos ficam geralmente restritos aos elementos integrantes do próprio circuito, o arco elétrico pode afetar o seu entorno, liberando energia descontroladamente, podendo atingir intensidade suficiente para destruir equipamentos e causar lesões pessoais severas ou até mesmo fatais, sendo considerado um dos perigos da eletricidade. É neste contexto que o arco elétrico é tratado neste trabalho.

⁵ IEEE: Institute of Electrical and Electronics Engineers (entidade norte-americana)

2.3 Os efeitos nocivos do arco elétrico

Arco elétrico⁶ é o termo aplicado à passagem de correntes elétricas substanciais inicialmente através do ar. Na verdade, como o ar é um mau condutor, a maior parte do fluxo de corrente ocorre através do vapor do material dos terminais do arco e das partículas ionizadas do ar. Esta mistura de materiais ionizados e superaquecidos através dos quais a corrente do arco flui é chamada de “plasma” [5]. À medida que a corrente flui pelo plasma, a energia elétrica é convertida em outras formas de energia extremamente perigosas [6].

A primeira forma de energia liberada por um arco elétrico é a luz intensa, que pode causar danos temporários ou permanentes à visão. A segunda e mais devastadora forma é a energia térmica. As temperaturas no entorno do arco elétrico podem chegar a 20.000 K, enquanto as temperaturas nos terminais do arco podem atingir até 50.000 K [5], valores maiores que a temperatura da superfície do Sol (estimada em 5.000 K). Queimaduras de alta gravidade podem ocorrer pela exposição direta ou indireta ao arco elétrico, sendo esta última relativa ao contato da pele com vestimentas que entram em ignição e continuam em chamas mesmo após cessado o arco. As altas temperaturas dão origem à terceira forma de energia que são as ondas de pressão causadas pela violenta expansão do ar e pela sublimação dos terminais metálicos do arco (*e.g.* o cobre se expande 67 mil vezes em volume) [7], podendo causar concussão pelo impacto das próprias ondas de pressão, ferimentos pela projeção de estilhaços, danos auditivos pela geração de ruído excessivo e intoxicação pela formação de gases nocivos.

O tratamento do acidentado grave por arco elétrico pode ser longo, doloroso e de alto custo, podendo também deixar sequelas físicas e causar sérios impactos psicossociais ao sobrevivente, como depressão, invalidez e abalo da estrutura familiar.

2.4 As causas iniciadoras do arco elétrico

Um arco elétrico é iniciado quando há uma ruptura da rigidez dielétrica do meio isolante entre dois pontos. As causas iniciadoras podem ser agrupadas da seguinte forma:

- Quando ocorre a diminuição da rigidez dielétrica do meio isolante, caracterizada pela razão entre máxima tensão suportada por unidade de comprimento.
 - Pela presença de contaminante (*e.g.* umidade, sujeira);
 - Por superaquecimento do ar (*e.g.* sobrecarga, mau contato).

⁶ Não há um termo específico para o arco elétrico como perigo em português. “Arco elétrico” é a tradução direta de “*electric arc*”, que em inglês faz referência ao fenômeno de maneira geral. As expressões “*arc flash*” (referente a luz e calor) e “*arc blast*” (referente a ondas de pressão e ruído) não possuem equivalentes em português.

- Quando ocorre o aumento da tensão, de modo que a razão da tensão pela distância exceda a rigidez dielétrica do meio isolante.
 - Por surtos atmosféricos;
 - Por surtos de manobra.
- Quando ocorre a diminuição da distância, de modo que a razão da tensão pela distância exceda a rigidez dielétrica do meio isolante.
 - Pela aproximação de polos desalinhados durante inserção/extração de gavetas;
 - Pela perda de sustentação de partes energizadas do circuito;
 - Pela presença de corpo estranho (*e.g.* ferramentas ou peças esquecidas, animais).

2.5 A evolução do conhecimento sobre o arco elétrico

2.5.1 Os primeiros estudos

O uso massivo da eletricidade na indústria teve início no final do Século XIX, em meio à 2ª Revolução Industrial, após um episódio conhecido como a “Guerra das Correntes”, como foi chamada a disputa técnico-comercial entre Thomas Edison e George Westinghouse [8] [9].

Nas décadas que se seguiram, a expansão dos sistemas elétricos veio acompanhada dos acidentes. Enquanto o choque elétrico já era um fenômeno bem estudado na metade do Século XX, o arco elétrico como fonte de perigo ainda era tido como algo “misterioso” [10].

Em 1960, um trabalho importante para a caracterização do fenômeno em termos de sistemas elétricos foi publicado por Kaufmann [11] que, entre outras coisas, observou que o arco elétrico impõe uma queda de tensão significativa ao sistema, implicando numa corrente de arco menor que a corrente de falta franca, podendo, inclusive, ser menor que a corrente de plena carga do sistema. Esta descoberta tornou mais dramático o dilema “proteção vs. continuidade de serviço” para o Engenheiro de Proteção, e chamou a atenção para a importância que deve ser dada para a determinação da corrente de curto-circuito mínima, ao contrário da cultura que até então se preocupava apenas com a corrente de curto-circuito máxima. Outras características observadas por Kaufmann foram:

- Em barramentos nus, um arco elétrico fase-terra provavelmente atingirá as outras fases, evoluindo para um arco trifásico;
- O arco se desloca em relação ao ponto original da falta, afastando-se da fonte;
- Quanto menor a tensão do sistema, maior a probabilidade do arco elétrico se auto extinguir, fato comum, mas não absoluto, em sistemas de 208 V (tensão fase-fase dos sistemas 120 V fase-neutro).

Em 1967, Shields [12] publicou um artigo analisando alguns dos vários “inexplicáveis” casos de destruição de equipamentos provocados por arco elétrico, ocorridos em sistemas de baixa tensão. O autor ainda enfatizou a seriedade do problema, pontuando que eventos de arco elétrico são mais graves que curtos-circuitos normais, pois podem se expandir “como um câncer” para outras áreas adjacentes, fora da zona de proteção do dispositivo responsável por monitorar o ponto da falta, podendo, inclusive, causar a destruição do próprio sistema de proteção. Destaca-se no trabalho a crítica ao baixo reconhecimento por parte da indústria (projetistas e usuários) sobre a necessidade de ações para minimizar a probabilidade de ocorrência dessas faltas destrutivas.

Até então, os trabalhos sobre arco elétrico se baseavam nos aspectos puramente elétricos do fenômeno, buscando uma modelagem em termos de análise de circuitos.

2.5.2 O método de Lee (1982)

Em 1982, o engenheiro Ralph Lee, que já havia desenvolvido importantes trabalhos sobre choque elétrico, publicou um trabalho pioneiro na segurança contra arco elétrico, intitulado *The Other Electrical Hazard: Electric Arc Blast Burns* [13]. Através de um desenvolvimento teórico, Lee estimou valores para as altas temperaturas ocorridas durante um evento de arco elétrico, discorreu sobre os efeitos dessas altas temperaturas sobre o tecido humano e vestimentas, e propôs fórmulas para calcular a distância limite entre um arco elétrico em local aberto e uma pessoa, estabelecendo as fronteiras a partir das quais poderiam ocorrer queimaduras com nível de gravidade “curável” e “incurável”. Lee finaliza seu artigo com uma sugestão de métodos de proteção a serem adotados em trabalhos com risco de arco elétrico.

2.5.3 O método de Doughty, *et al.* (1998)

Em 1996, um importante trabalho publicado por Neal, Bingham e Doughty [14] apontou a necessidade de reavaliar as fórmulas propostas por Ralph Lee, pois seu método era baseado na teoria da máxima transferência de potência e considerava que toda a energia elétrica seria convertida em energia incidente, o que levava a resultados conservadoramente altos de energia. Entre as possíveis causas, foi citado que:

- A modelagem de Lee era baseada na teoria senoidal, enquanto o arco elétrico possui grande conteúdo harmônico;
- Ensaios mostravam que a queda de tensão do arco “podia não ser igual” à queda de tensão do sistema durante um evento; e,

- Parte significativa da potência do arco seria consumida pelo derretimento e vaporização dos eletrodos, não se transformando em energia radiante.

Por outro lado, foi verificado que os efeitos nocivos de um arco elétrico podem ser amplificados quando ele ocorrer dentro de um invólucro, pois sua energia pode ser canalizada para uma determinada direção, aumentando significativamente o risco de danos físicos a um trabalhador exposto. Entre outras contribuições, o trabalho também cunhou o termo “energia incidente”, estabeleceu o valor de $1,2 \text{ cal/cm}^2$ para definir o “limite de aproximação segura” (ou o limiar para queimaduras de segundo grau, conforme a Curva de Stoll [15]), e propôs um sistema de classificação para vestimentas de proteção contra arco.

Por fim, foi sugerido que o melhor método para o estudo da energia do arco elétrico seria a medição direta (ensaio em laboratório), em função do comportamento caótico do arco elétrico resultante de uma falta trifásica, que cria forças magnéticas de atração e repulsão, movendo e expandindo a nuvem de plasma, podendo causar extinção e reignição do arco, e mudanças abruptas e irregulares na sua geometria, o que torna difícil o estabelecimento de um modelo que estime com precisão suas propriedades [6].

Em 1998, com o artigo *Predicting Incident Energy to Better Manage the Electric Arc Hazard on 600-V Power Distribution Systems*, os autores Doughty, Neal e Floyd II [16] propõem equações para o cálculo de energia incidente em sistemas de baixa tensão baseadas em ensaios, incluindo um modelo para arco elétrico dentro de um invólucro.

2.5.4 O método IEEE Std 1584-2002

Em 2002, foi publicada a primeira edição da norma IEEE Std 1584, que apresenta um método empírico de cálculo de energia incidente baseado em ensaios de laboratório, sendo uma evolução do trabalho de Doughty, Neal e Floyd II [16].

Por ser um método com faixa mais ampla de aplicações, por levar em conta a influência de várias características dos sistemas (*e.g.* tipo de equipamento, tipo de aterramento), e por apresentar resultados considerados pela comunidade técnica como mais coerentes com a realidade do que o método teórico, esta norma tornou-se o método mais aplicado pela indústria, em sistemas de corrente alternada de baixa e média tensão.

Esta edição da norma estabelecia um “ponto de corte” (posteriormente alterado) no estudo de arco elétrico, dispensando de avaliação os equipamentos abaixo de 240 V alimentados por transformador com potência menor que 125 kVA.

2.5.5 O método IEEE Std 1584-2018

No final de 2018, foi publicada a segunda edição da IEEE Std 1584, introduzindo várias mudanças. Baseada em 1.860 ensaios (a edição de 2002 era baseada em apenas 300 ensaios), esta nova edição começou a levar em conta a variação da disposição e do espaçamento entre os eletrodos, das dimensões do invólucro e estabeleceu um fator de variação de corrente, dependente da tensão nominal do sistema, para estimar a corrente de arco mínima (na edição de 2002, a corrente mínima era fixada em 85% da máxima).

Este aperfeiçoamento do método, no entanto, veio acompanhado de uma maior necessidade de cálculos, cuja solução “manual” do modelo torna-se praticamente inviável, sendo recomendada a utilização de planilhas eletrônicas ou outra ferramenta computacional mais específica.

A edição de 2018 também alterou ponto de corte do estudo, retirando a dispensa de avaliação dos equipamentos abaixo de 240 V alimentados por transformador com potência menor que 125 kVA. A nova redação passou a ser mais conservadora, declarando que “arcos sustentáveis são possíveis, mas menos prováveis, em sistemas trifásicos operando em 240 V nominais ou menos com uma corrente de curto-circuito presumida menor que 2.000 A”.

2.6 Normatização sobre o arco elétrico

2.6.1 Normatização internacional

Assim como ocorre em outras áreas da normatização aplicável aos sistemas elétricos, o mundo se divide em dois grandes grupos técnicos: o grupo norte-americano com as normas ANSI⁷ e o grupo europeu ou internacional com as normas IEC⁸.

No que diz respeito ao arco elétrico, esta divisão se reflete em diferentes abordagens. Enquanto nos EUA existe um esforço no sentido do desenvolvimento de estudos para estimar a energia incidente, visando proteger os indivíduos na ocorrência de um arco, na Europa é dada maior importância aos métodos coletivos e preventivos, visando evitar a ocorrência de arco elétrico [17].

Nos EUA, a OSHA⁹ é o órgão de Estado que atua na área de segurança do trabalho e cuja regulamentação tem força de lei. Por sua vez, o sistema de normatização norte-americano

⁷ ANSI: American National Standards Institute (entidade norte-americana).

⁸ IEC: International Electrotechnical Commission (entidade internacional).

⁹ OSHA: Occupational Safety and Health Administration (entidade norte-americana).

é coordenado pela ANSI, entidade privada e sem fins lucrativos que não elabora normas, mas credencia organizações que as desenvolvem, cujos padrões passam a ter o status de norma americana com a sua chancela. Entre as organizações mais importantes na elaboração de normas relacionadas ao arco elétrico, pode-se citar:

- **NFPA¹⁰**: Responsável pela elaboração da NFPA 70E, que é a norma mais abrangente sobre segurança elétrica, delineando requisitos técnicos para o atendimento às exigências legais da OSHA. A NFPA 70E foi a primeira norma de segurança a reconhecer o arco elétrico como perigo, na sua Edição de 1995 [18];
- **IEEE**: Responsável pela elaboração da principal norma para o cálculo de energia incidente, a IEEE Std 1584, cuja última edição (2018) foi o resultado de um trabalho colaborativo entre IEEE e NFPA;
- **ASTM¹¹**: Responsável pela elaboração de normas para especificação e ensaio de materiais à prova de arco elétrico. Tendo nascido como uma organização norte-americana, a entidade assumiu sua influência mundial e oficialmente ampliou sua abrangência territorial, passando a se chamar ASTM International no ano de 2001.

Salvo os casos em que as normas ANSI são diretamente citadas nas regulamentações da OSHA, sua aplicação é voluntária. Ainda assim, elas têm grande influência por representarem um consenso técnico entre academia, fabricantes e usuários, inclusive fora dos EUA.

Na Europa, não há regulamentação que exija a execução de estudo de energia incidente nem a utilização de EPIs contra arco elétrico. Estes aspectos não são cobertos pelas normas IEC, que se voltam principalmente para as técnicas de mitigação passivas (*e.g.* conjuntos de manobra e comando classificados para arco) e, mais recentemente, ativas (*e.g.* dispositivos de extinção de arco). Evidentemente, trata-se de uma lacuna, pois é inverossímil que nunca ocorra uma situação em que seja necessária a realização de serviço em sistema energizado com exposição ao arco elétrico. Nesses casos, as normas europeias exigem a realização de análise de riscos, contando com a competência do profissional que não terá a sua disposição outra fonte de referência normativa além das normas ANSI para determinar os EPIs necessários [17].

2.6.2 Normatização nacional

No Brasil, na versão atual da Norma Regulamentadora N° 10 (NR-10) [19], publicada em 2004, o termo “arco elétrico” consta apenas uma única vez, no Anexo II, como um tópico do conteúdo programático do Curso Básico. A NR-10 não estabelece diretrizes específicas para

¹⁰ NFPA: National Fire Protection Association (entidade norte-americana).

¹¹ ASTM: American Society for Testing and Materials (entidade internacional).

a gestão do risco de arco elétrico, ficando sempre subentendido que o tema está incluído quando a norma cita genericamente os “riscos elétricos”, ou quando determina que a especificação das vestimentas de trabalhos deve contemplar a “inflamabilidade”. Consta nos parágrafos iniciais da NR-10 que, “no caso da ausência ou omissão das normas técnicas estabelecidas pelos órgãos competentes”, é prevista a aplicação das “normas internacionais cabíveis”. O Brasil, sendo signatário do Acordo sobre Barreiras Técnicas ao Comércio da OMC¹², tem o compromisso de seguir padrões internacionais, entretanto, diante da lacuna existente na normatização IEC no que diz respeito à avaliação da energia incidente, é legítima a adoção dos padrões ANSI/IEEE.

Em 18 de março de 2020, foi publicada a NBR 16384 [20], primeira norma brasileira sobre segurança em eletricidade a prescrever recomendações específicas a respeito da proteção contra arco elétrico. Entre as recomendações, cita-se:

- As vestimentas de proteção contra arco elétrico devem ser especificadas por meio de um método internacionalmente reconhecido (item 4.6 da NBR 16384);
- O estudo de energia incidente e a especificação das medidas de proteção contra arco elétrico devem ser mantidos atualizados e fazer parte do prontuário da instalação elétrica (item 4.7.4, alíneas “c” e “e” da NBR 16384);

Além dos itens normativos, a NBR 16384 apresenta anexos de caráter informativo ou orientativo. A seguir, destaca-se alguns pontos relativos à proteção contra arco elétrico.

- **Anexo A¹³**: Define a “zona de risco de arco elétrico” como a região com energia incidente acima de 1,2 cal/cm² (item A.5 da NBR 16384);
- **Anexo B¹⁴**: Apresenta recomendações para gestão do risco em serviços realizados em conjunto de manobra e comando (item B.6.7.1 da NBR 16384). Entre elas:
 - Não realizar intervenção em painel com energia incidente calculada superior a 40 cal/cm². Para estas situações, deve-se trabalhar o painel desenergizado ou realizar análise e implementar a redução de energia incidente;
 - Intervenções com energia incidente calculada superior a 8 cal/cm² devem ser realizadas em dupla;
 - Alterações em sistema de geração, na topologia da distribuição ou em ajuste de proteção devem ser precedidas de estudo de energia incidente;
 - Estudos de energia incidente necessitam ser arquivados para efeito legal.
- **Anexo E¹⁵**: Orienta a aplicação de vestimenta de proteção através de categorias.

¹² OMC: Organização Mundial do Comércio.

¹³ Anexo da NBR 16384.

¹⁴ Anexo da NBR 16384.

¹⁵ Anexo da NBR 16384.

Com relação às orientações sobre a proteção contra arco elétrico, pode-se citar alguns pontos da NBR 16384 que possuem abordagem diferente da IEEE Std 1584-2018 e da NFPA 70E-2021:

- O **Anexo B**¹⁶ faz referência ao critério de exclusão da necessidade de avaliação da energia incidente para equipamentos abaixo de 240 V alimentados por transformador com potência menor que 125 kVA. Este critério foi eliminado da IEEE Std 1584 com a publicação da Edição de 2018, portanto, era esperado que ele não constasse numa norma publicada em 2020;
- O **Anexo E**¹⁷ destoa da abordagem da NFPA 70E-2021, que define que as categorias somente são aplicáveis para a seleção direta do EPI através de tabelas, sem a realização de cálculo de energia incidente, o que é chamado pela NFPA 70E de “Método da Categoria de EPI”. Com esta mixórdia, a NBR 16384 oficializa uma confusão habitual no entendimento dos conceitos da norma de referência, além de criar termos próprios para as categorias (AE-1 a AE-4) sem definir a faixa de energia incidente de cada uma delas. Também é notória a aplicação truncada do conceito de Classificação de Arco, considerando apenas o ATPV¹⁸ da vestimenta, ignorando a existência do E_{BT}¹⁹, conceitos que serão discutidos no item 3.4.3.3.

Apesar de apresentar algumas orientações que diferem da abordagem da norma norte-americana, a publicação da NBR 16384 é o primeiro passo para preencher a lacuna do tema arco elétrico na normatização brasileira. Sendo muito recente, seus impactos ainda não podem ser avaliados. Em alguns pontos, representa um salto de exigência na gestão da segurança em eletricidade, que demandará tanto investimento quanto mudança cultural nas empresas.

A observância das normas da ABNT²⁰ adquire caráter compulsório somente quando solicitada por algum regulamento com força de Lei. Atualmente, está em discussão na comunidade técnica a revisão da NR-10, que poderá impulsionar a adoção da NBR 16384 e colocar em termos mais claros a necessidade de gestão sobre a segurança contra arco elétrico.

2.7 Considerações finais

Este capítulo definiu o arco elétrico no contexto da segurança elétrica, apresentou uma síntese sobre a evolução dos métodos de cálculo de energia incidente e discutiu aspectos normativos internacionais e nacionais.

¹⁶ Anexo da NBR 16384.

¹⁷ Anexo da NBR 16384.

¹⁸ ATPV: *Arc Thermal Performance Value* (“valor de desempenho térmico ao arco”).

¹⁹ E_{BT}: *Breakopen Threshold Energy* (“limite de energia de ruptura”).

²⁰ ABNT: Associação Brasileira de Normas Técnicas.

A Figura 2.1 apresenta alguns dos marcos da evolução dos estudos sobre o arco elétrico sob a forma de linha do tempo.

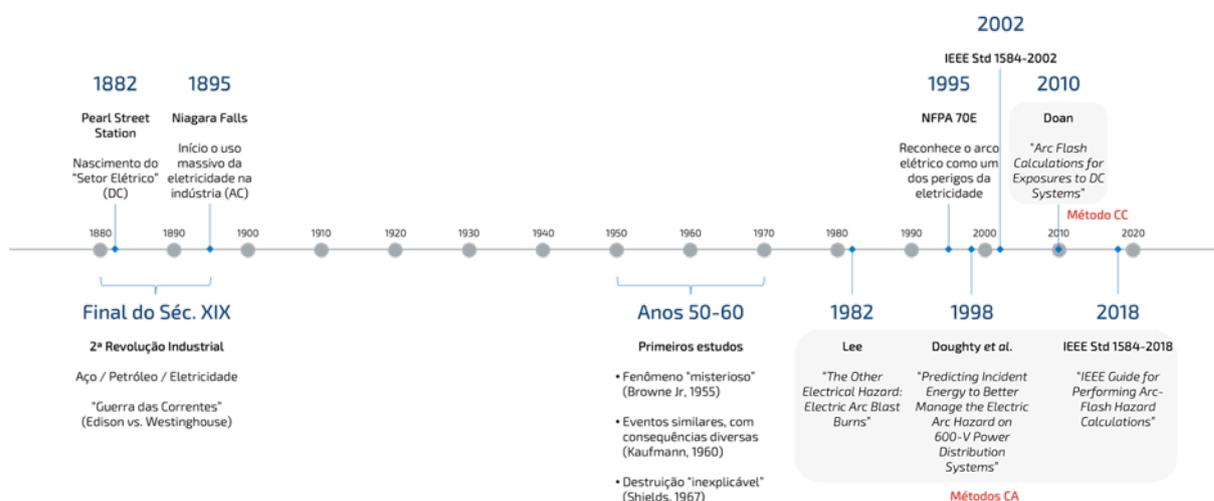


Figura 2.1 – Linha do tempo com marcos da evolução dos estudos sobre o arco elétrico.

Nota-se uma lacuna de um século entre o início do uso em larga escala da eletricidade na indústria (considerando, simbolicamente, a inauguração da central elétrica de Niagara Falls o seu marco inicial) e o reconhecimento normativo do arco elétrico como perigo, a partir da edição de 1995 da NFPA 70E.

Assim, pode-se sugerir uma relação entre o reconhecimento "tardio" e a dificuldade de compreensão e percepção de riscos deste perigo.

3 GESTÃO DO RISCO DE ARCO ELÉTRICO

3.1 Considerações iniciais

A gestão do risco é uma prática necessária para a execução de atividades perigosas com segurança. Uma referência para a sua aplicação é a ISO 31001 [21], e a Figura 3.1 ilustra uma síntese do processo de gestão do risco de arco elétrico, baseada nesta norma.



Figura 3.1 – Etapas do processo de gestão do risco de arco elétrico – Adaptado de [21].

Este capítulo, estruturado conforme as etapas apresentadas na Figura 3.1, visa situar e mostrar a importância do estudo de energia incidente dentro deste processo, bem como recapitular e discutir as medidas para tratamento do risco de arco elétrico.

3.2 Identificação das fontes de perigo

Acidentes com arco elétrico podem acontecer em praticamente qualquer sistema de potência energizado. No entanto, é sabido que em sistemas com tensões nominais mais baixas a ocorrência de um arco elétrico sustentado é mais improvável, ainda que nenhuma norma estabeleça claramente qual é este limite. Recai sobre o profissional encarregado do estudo definir a sua abrangência.

Em um sistema industrial, normalmente são considerados pontos de análise todos os nós ou barras entre os equipamentos que fazem parte do fluxo principal de distribuição de energia. Atenção especial deve ser dada aos pontos passíveis de operação, inspeção ou manutenção presencial humana enquanto energizados. Os equipamentos que costumam ser o foco das atenções quando o assunto é risco de arco elétrico em uma indústria são os conjuntos de manobra e comando.

Na indústria, é comum ainda a classificação dos conjuntos de manobra e comando em dois tipos, de acordo com a função e características construtivas:

- **CDC²¹**: Conjunto de manobra e comando que geralmente é alimentado pelo transformador de entrada da subestação. Alimenta outros painéis e motores de maior porte. Pode ser identificado pela estrutura mais robusta, sendo comum a existência de dois cubículos de entrada, um de interligação, e múltiplas saídas. Os cubículos normalmente são equipados com disjuntores abertos ou PCBs²² e relé de proteção ou IED²³, ou conjunto contator-fusível nas saídas para motores;
- **CCM²⁴**: Conjunto de manobra e comando que geralmente é alimentado por um CDC. É destinado ao acionamento de motores. Em geral, possui apenas uma entrada, e pode ter dezenas ou até centenas de unidades de saída do tipo gaveta. As gavetas normalmente são equipadas com os dispositivos básicos para o comando e proteção de motores elétricos (*e.g.* disjuntor, fusível, contator, relé térmico).

A Figura 3.2 apresenta, a título de exemplo, desenhos com a vista frontal de um CDC e de um CCM, onde algumas características descritas podem ser observadas.

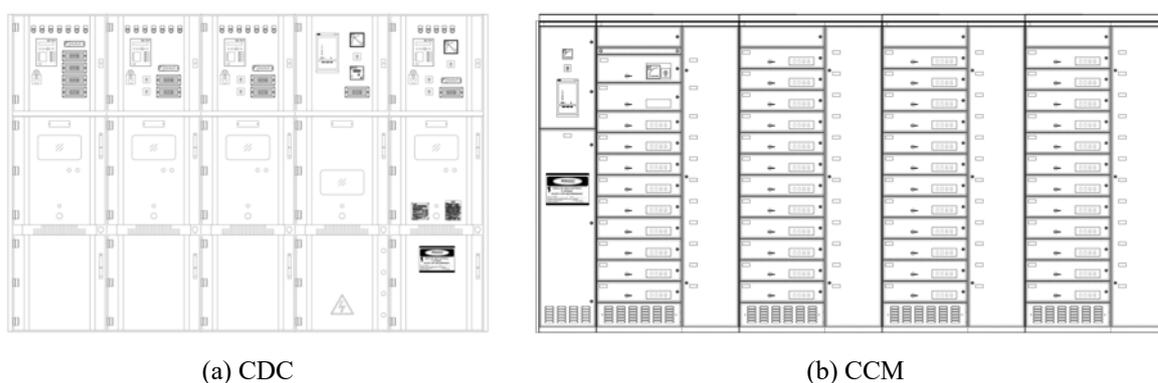


Figura 3.2 – Exemplos de conjunto de manobra e comando tipo CDC e CCM.

Essas definições não são rígidas. Existem os conjuntos de manobra e comando mistos, que possuem características dos dois tipos, sendo nestes casos chamados de “CDC misto” ou “CCM misto”.

Na sua essência, ambos os tipos são *hubs*²⁵ de energia elétrica, destinados a distribuí-la para os vários circuitos da instalação a partir de uma fonte de energia de considerável potência, e sujeitos a intervenções humanas.

²¹ CDC: Centro de Distribuição de Cargas.

²² PCB: *Power Circuit Breaker* (“disjuntor de potência ou aberto”).

²³ IED: *Intelligent Electronic Device* (“dispositivo eletrônico inteligente”).

²⁴ CCM: Centro de Comando de Motores.

²⁵ *Hub*: Equipamento central de uma rede, que interliga diversos circuitos.

3.3 Análise de riscos da intervenção

3.3.1 Definição de risco

A ISO 45001 [22] define como risco de SSO²⁶ a “combinação da probabilidade de ocorrência de eventos ou exposições perigosas relacionadas aos trabalhos e da gravidade das lesões e problemas de saúde que podem ser causados pelo(s) evento(s) ou exposição(ões)”.

Deste modo, pode-se identificar que o processo de análise deve considerar dois aspectos do risco: (1) probabilidade de ocorrência e (2) severidade dos efeitos.

3.3.2 Estimativa da probabilidade de ocorrência de um arco elétrico

Os motivos que podem originar um arco elétrico são conhecidos. O que geralmente não se sabe é quando ele vai ocorrer. A estimativa de uma probabilidade numérica para a ocorrência de um arco elétrico durante um serviço pode ser considerada subjetiva e idiossincrática.

Mesmo sendo, por definição, um componente necessário da análise de riscos, poucas fontes na literatura explicam como realizar uma estimativa da probabilidade de ocorrência de arco elétrico na prática. Uma das poucas referências é a norma americana NFPA 70E-2021, que orienta a análise através de uma série de exemplos de tarefas comuns no dia a dia do trabalhador da área elétrica industrial que, combinados com a condição do equipamento, resultam em uma probabilidade de ocorrência binária: Não (não é provável que ocorra um arco elétrico) ou Sim (é provável que ocorra um arco elétrico). O Quadro 3.1 é uma adaptação com uma pequena amostra das tarefas apresentadas na Tabela 130.5(C) da NFPA 70E-2021, cuja versão completa consta no Anexo A.1.

Quadro 3.1 – Estimativa da probabilidade de arco elétrico.

Tarefa	Condição do equipamento	Probabilidade de ocorrência
Leitura de um medidor de painel enquanto se opera a chave seletora do medidor.	Qualquer	Não
Inserção/extração de disjuntores ou demarradores nos/dos seus cubículos, com portas abertas ou fechadas.	Qualquer	Sim
Abrir uma porta ou tampa articulada de painel para acessar dispositivos de sobrecorrente com frontal cego.	Normal	Não
Manutenção e teste em células individuais ou em blocos multicelulares individuais em baterias com rack aberto.	Anormal	Sim

Fonte: Adaptado de [3].

²⁶ SSO: Saúde e Segurança Ocupacional.

3.3.3 Estimativa da severidade dos efeitos de um arco elétrico

O segundo componente da análise do risco de arco elétrico é a estimativa da severidade dos seus efeitos, caso ele ocorra. Isso é feito através de um estudo de energia incidente que envolve, além das informações dos estudos de curto-circuito e proteção, levantamento de dados técnicos da instalação e uma série de cálculos adicionais. Em sistemas industriais, onde o sistema elétrico pode ser de grande porte, com dezenas de subestações internas e centenas de barras, o uso do computador torna-se praticamente indispensável.

Os métodos sugeridos pela NFPA 70E-2021 são os que constam no Quadro 3.2, onde também são indicadas as faixas de parâmetros para os quais cada método é permitido.

Quadro 3.2 – Métodos para cálculo de energia incidente.

Método	Limitações / Parâmetros	Ref.
Ralph Lee	Calcula a energia incidente e o limite de aproximação segura para arco ao ar livre; conservador acima de 600 V, e se torna mais conservador à medida que a tensão aumenta.	[13]
Doughty <i>et al.</i>	Calcula a energia incidente para arco trifásico em sistemas com tensão nominal de 600 V ou menos; aplica-se a correntes de curto-circuito entre 16 kA e 50 kA.	[16]
IEEE Std 1584 (2018)	Calcula a energia incidente e o limite de aproximação segura para: 208 V a 15 kV; trifásico; 50 Hz a 60 Hz; Curto-circuito de 500 A a 106 kA (208 V a 600 V) e de 200 A a 65 kA (601 V a 15 kV); Espaço entre condutores de 6,35 mm a 76,2 mm (208 V a 600 V) e de 13 mm a 152 mm (601 V a 15 kV).	[2]
Doan	Calcula a energia incidente para sistemas de corrente contínua com tensão nominal até 1000 V.	[23]

Fonte: Adaptado de [3].

Além dos métodos citados no Quadro 3.2, é possível encontrar na comunidade técnica artigos com propostas de novos métodos, alguns baseados em modificações dos métodos atuais, ou métodos gráficos para realizar a estimativa de energia incidente sem a necessidade de muitos cálculos. Também há no mercado softwares comerciais²⁷, como o Kinectrics ArcPro, cuja metodologia é baseada em ensaios desenvolvidos em laboratório próprio, recomendado para sistemas acima de 15 kV e reconhecido pela OSHA.

Os sistemas elétricos industriais são “dinâmicos”, *i.e.*, sofrem modificações ao longo do curso da sua vida, pelos mais diversos motivos: ampliações, alterações de manutenção, mudança de filosofia de operação etc. Por consequência, os estudos de energia incidente devem ser atualizados com alguma frequência para que continuem representando o sistema real, de modo que a avaliação de riscos seja baseada em informações fidedignas. A NFPA 70E-2021 determina que o prazo para revisão do estudo não deve exceder a cinco anos.

²⁷ Aplicativos comerciais como PTW ou ETAP não são considerados métodos, eles são ferramentas computacionais que executam cálculos conforme algum dos métodos citados.

3.4 Controle do risco de arco elétrico

3.4.1 Estratégia geral

Após a identificação das fontes de perigo e da análise do risco de arco elétrico, deve ser feito um julgamento se a incolumidade do trabalhador pode ser razoavelmente garantida pelas condições existentes, ou se medidas de proteções adicionais são necessárias. Caso sejam necessárias medidas de proteção adicionais, elas devem seguir o princípio da hierarquia das medidas de controle de SSO, conforme definido pela ISO 45001 [22]:

- a) Eliminar os perigos;
- b) Substituir por processos, operações, materiais ou equipamentos menos perigosos;
- c) Utilizar controles de engenharia e reorganização do trabalho;
- d) Utilizar controles administrativos, incluindo treinamento;
- e) Utilizar equipamento de proteção individual (EPI) adequado.

No que diz respeito à proteção contra arco elétrico, a eliminação do perigo mais absoluta é a desenergização, porém, às vezes ela também é impossível ou inviável, assim como outras medidas de controle prioritárias. Pela filosofia de SSO, o emprego de EPIs deve ser a última opção de medida de controle, ainda que na prática sua aplicação seja muito comum.

Como o risco é um conceito composto pela combinação de dois elementos, conforme definido em 3.3.1, a estratégia geral para o controle do risco de arco elétrico consiste na atuação sobre os aspectos gerenciáveis desses dois componentes. Desta maneira, as medidas de controle podem ser categorizadas conforme sua relação com os componentes do risco [24]:

- **Medidas baseadas na prevenção da ocorrência:** Atuam no primeiro componente do risco, *i.e.*, visam reduzir a probabilidade de que um arco elétrico ocorra;
- **Medidas baseadas na mitigação de danos:** Atuam no segundo componente do risco, *i.e.*, visam reduzir a severidade de um arco elétrico, se ele ocorrer. Este grupo pode ser subdividido em:
 - Medidas passivas: São medidas que não influenciam a energia emitida pelo arco elétrico, mas atuam para que ela não atinja ou não lesione o trabalhador. Tipicamente se baseiam na distância da fonte do arco, ou em barreiras de contenção posicionadas entre o trabalhador e o arco;
 - Medidas ativas: São medidas que visam reduzir a energia emitida pelo arco elétrico. Tipicamente se baseiam na redução da corrente ou da duração de arco.

As medidas de controle não são mutuamente exclusivas, elas podem ser combinadas com o objetivo de formar um sistema de camadas de proteção.

3.4.2 Medidas baseadas na prevenção da ocorrência

3.4.2.1 Treinamento

O treinamento é um requisito básico para o exercício de qualquer atividade perigosa. No caso do arco elétrico, a NR-10 estabelece que todo trabalhador autorizado deve ser treinado para ser capaz de identificar os perigos da eletricidade e agir de forma segura.

Mais do que prover conhecimento técnico, o treinamento deve desenvolver a percepção de riscos, contribuindo para evitar o erro humano. A percepção de riscos é um fator crucial para a segurança, pois a ausência da mesma pode induzir o trabalhador a uma atitude que inutilize todas as outras medidas de controle do risco que tenham sido tomadas [25].

3.4.2.2 Manutenção preventiva

Uma manutenção preventiva adequadamente executada e em dia é um dos requisitos básicos para a operação segura de qualquer equipamento ou sistema industrial. No caso particular da prevenção do arco elétrico, a inspeção do estado de componentes e a execução de tarefas simples são suficientes para eliminar vários fatores de risco para ruptura da rigidez dielétrica, como:

- **Limpeza:** Retirar sujeira e outros possíveis contaminantes;
- **Reaperto de conexões:** Evitar sobreaquecimento;
- **Lubrificação e alinhamento de componentes móveis:** Manter distâncias mínimas;
- **Fechamento de aberturas em painéis:** Evitar entrada de animais.

A contribuição de uma manutenção adequada à prevenção da ocorrência de arco elétrico pode ser presumida pela Tabela 130.5(C) da NFPA 70E-2021, que consta no Anexo A.1. Nesta tabela, são várias as situações em que a condição “normal” do equipamento indica que um arco não é provável de acontecer, enquanto a condição “anormal” indica que o mesmo é provável. Uma das condições para que a condição do equipamento seja considerada “normal” é que ele tenha tido manutenção adequada.

3.4.2.3 Manutenção preditiva

A manutenção preditiva, que também é chamada de manutenção baseada em condição (do equipamento), se difere da manutenção preventiva em vários aspectos, sendo o mais fundamental a utilização de alguma técnica de medição, monitoramento ou análise de parâmetros físicos que possibilite avaliar alguma condição específica do equipamento.

Uma das técnicas de manutenção preditiva mais usadas em sistemas elétricos industriais é a inspeção termográfica, que consiste no uso de uma câmera infravermelha para identificar pontos quentes, que são potenciais causas de arco elétrico. Paradoxalmente, a inspeção termográfica é uma atividade que contribui para evitar ocorrências de arco, mas ao mesmo tempo a sua realização expõe o próprio executante ao risco, pois necessariamente deve ser realizada com os sistemas energizados e sob carga. Há métodos conhecidos para a gestão deste risco, como o uso de janelas de inspeção termográficas, uso de sensores infravermelhos fixos, trabalho à distância segura e, por fim, o uso de EPIs.

3.4.2.4 Intertravamento

Os intertravamentos são dispositivos ou sistemas destinados a bloquear a execução de manobras erradas no sistema elétrico, visando evitar falhas que possam causar, entre outras consequências, a ignição de um arco elétrico. Podem ser de vários tipos:

- **Mecânico:** Implementado por bloqueios mecânicos. É baseado em travas acionadas por chave que impedem manobras ou acessos indevidos a compartimentos;
- **Elétrico:** Implementado por lógica de contatos eletromecânicos. É baseado em dispositivos como contatores e relés auxiliares (desde eletromecânicos até digitais);
- **Lógico:** Implementado por lógica de programação. É baseado em dispositivos como IEDs e redes de automação elétrica. Inicialmente visto com hesitação pela indústria, atualmente o intertravamento lógico têm sido cada vez mais aplicado.

3.4.3 Medidas baseadas na mitigação de danos – Medidas passivas

3.4.3.1 Operação remota

No contexto da proteção contra arco elétrico, “operação remota” tem o sentido de uma operação na qual o trabalhador que a está executando se encontra afastado o suficiente para não ser atingido pela energia do arco elétrico, caso ele ocorra.

Pode ser considerada uma forma de proteção baseada na distância da fonte de perigo. Uma vez que a energia incidente se atenua exponencialmente à medida que se afasta da fonte do arco, o trabalhador deve estar posicionado além do limite de aproximação segura. Com os recursos modernos de automação, esta operação remota pode ser realizada por um trabalhador localizado fora da instalação de potência e até mesmo, literalmente, em outra cidade. Nestes casos, sob a ótica apenas do trabalhador, esta medida de controle pode ser considerada como uma medida preventiva, pois a exposição física ao perigo inexistente.

Entretanto, sob uma ótica mais ampla, a operação remota deve ser considerada uma medida de mitigação, pois, apesar da sua eficácia na proteção do ser humano, sua aplicação pura e simples não oferece proteção aos equipamentos.

A seguir, são listadas algumas formas de aplicação da filosofia de operação remota:

- **Uso de extensores:** Técnica simples, na qual pode ser empregado um bastão isolante com ou sem instrumento/ferramenta acoplado. A extensão do bastão deve ser suficiente para posicionar o operador além do limite de aproximação segura;
- **Comando temporizado:** Técnica na qual uma manobra não é realizada instantaneamente ao se pressionar o botão de fechamento ou abertura de contatos localizado no conjunto de manobra e comando. O acionamento do botão pelo operador deve disparar um temporizador, que deve contar tempo suficiente para que o operador se afaste até uma posição segura e, em seguida, comandar a manobra automaticamente;
- **Comando via sistema de automação:** Técnica comum em grandes indústrias que possuem sistemas de DCS²⁸, onde o comando é realizado via centro de controle, sem necessidade da presença de operador em frente ao conjunto de manobra e comando. Sistemas do tipo DCS têm custo muito alto, mas são comumente encontrados em indústrias de processo contínuo, como as de refino do petróleo;
- **Sistema de inserção/extração remota:** Também conhecido pela sigla RRS²⁹, consiste em um sistema motorizado de inserção/extração de disjuntores, podendo ser de uso dedicado (instalado no cubículo, um por disjuntor) ou móvel (instalado em carrinho, aplicável a vários disjuntores). Nos sistemas móveis, o operador deve posicionar o carrinho em frente ao cubículo e fazer os ajustes necessários para acoplar mecanicamente o dispositivo de inserção/extração ao disjuntor. Após se posicionar a uma distância segura, o operador pode comandar a inserção/extração através de um controle remoto.

Apesar de haver diversas tecnologias para a operação remota, ainda há poucas para a manutenção remota. Atualmente, a manutenção ainda é muito baseada em técnicas tradicionais, mas existe uma tendência de evolução com a chamada “Indústria 4.0”, como foi batizada a 4ª Revolução Industrial, baseada em AI³⁰ e IoT³¹. Com estes conceitos aplicados à área de manutenção, que tem sido chamada de “Manutenção 4.0”, há uma expectativa de evolução nos sistemas e métodos de medição, diagnóstico e até mesmo de reparo que possam reduzir a exposição humana ao perigo de arco elétrico.

²⁸ DCS: *Distributed Control Systems* (“sistema de controle distribuído”).

²⁹ RRS: *Remote Racking System* (“sistema de inserção/extração remota”).

³⁰ AI: *Artificial Intelligence* (“inteligência artificial”).

³¹ IoT: *Internet of Things* (“internet das coisas”).

3.4.3.2 Conjunto de manobra e comando classificado para arco interno

Via de regra, os equipamentos elétricos, são projetados para evitar ao máximo que falhas ocorram. As normas técnicas para a fabricação de conjuntos de manobra e comando incorporam a filosofia *safety by design*, também conhecida como *prevention through design*, *i.e.*, fabricar o equipamento com medidas de segurança pensadas desde o projeto, *e.g.*, desenvolvimento de dispositivo para inserção/extração com portas fechadas, utilização de isolamento sólida na maior extensão possível dos condutores, aplicação de barreiras entre fases de modo a conter a evolução de um arco monofásico para trifásico etc.

Ainda assim, considerando que nenhum equipamento está livre de falhas, existem normas e relatórios técnicos que estabelecem métodos de ensaio e critérios de aprovação para se avaliar a proteção oferecida por conjuntos de manobra e comando numa ocorrência de arco elétrico. Para equipamentos que seguem as especificações IEC, há duas referências (divididas por faixa de tensão), enquanto que para os equipamentos que seguem as especificações ANSI, uma referência abrange todas as faixas de tensão, conforme indicado no Quadro 3.3.

Quadro 3.3 – Referências para conjunto de manobra e comando à prova de arco.

Tensão [kV]	IEC	ANSI
$1 < U_N \leq 52$	IEC 62271-200 [26]	IEEE C37.20.7 [27]
$U_N \leq 1$	IEC TR 61641 [28]	

A seguir, alguns pontos importantes das referências listadas.

- **IEC 62271-200:** Norma que define a classificação IAC³² para os conjuntos de manobra e comando de média/alta tensão. A classificação IAC é representada por um código composto por quatro parâmetros: (1) tipo de acessibilidade; (2) faces acessíveis; (3) corrente de arco; e, (4) duração de arco. Nem todo conjunto de manobra e comando de média/alta tensão possui classificação IAC. Esta classificação deve ser requisitada pelo cliente quando o risco da instalação for considerado relevante, e o atendimento à classificação IAC pelo fabricante deve ser comprovado através de ensaio. O ensaio tem como objetivo avaliar a proteção oferecida pelo equipamento, em condições normais de operação. Isto significa que a classificação IAC não abrange situações de manutenção, como a substituição de componentes ou outros serviços executados com portas ou tampas abertas (salvo nos casos em que a abertura é necessária para a realização de alguma operação normal, devendo o equipamento ser testado nesta condição), nem a capacidade do equipamento manter a continuidade operacional após um evento de arco elétrico;

³² IAC: *Internal Arc Classified* (“classificação de arco interno”).

- **IEC TR 61641:** As normas para conjuntos de manobra e comando de baixa tensão são as da série IEC 61439. Esta série de normas sucedeu a série IEC 60439, abolindo os termos TTA³³ e PTTA³⁴, que foram substituídos pela abordagem de verificação através de ensaios, cálculos ou critérios de projeto, mas que também não abrangem a proteção contra arco elétrico. Caso se deseje que a proteção ao arco elétrico de um conjunto de manobra e comando de baixa tensão seja avaliada, deve ser utilizado o relatório técnico IEC TR 61641, que não possui o status de norma, sendo um guia de referência para aplicação mediante acordo entre fabricante e usuário. O IEC TR 61641 estabelece quatro classes de arco (“A”, “B”, “C” e “I”), sendo de especial interesse as classes “B”, que indica que não há propagação do arco para compartimentos adjacentes ao ensaiado, e “C”, que indica que o conjunto de manobra é capaz de operar após um evento de arco elétrico, após segregação elétrica do compartimento atingido;
- **IEEE Std C37.20.7:** Norma que define a classificação de arco dos conjuntos de manobra e comando através de quatro parâmetros: (1) acessibilidade; (2) sufixos (“A”, “B”, “C” e “D”) que indicam requisitos adicionais; (3) corrente de arco; e, (4) duração de arco. Destaque para os sufixos “B”, que indica proteção com o compartimento de comando e proteção em baixa tensão aberto, e “C”, que indica que não há propagação do arco para compartimentos adjacentes ao ensaiado.

As três referências apresentam critérios semelhantes no que diz respeito à proteção contra arco elétrico em condições “normais”, *i.e.*, com todas as portas e tampas fechadas. A principal diferença está nos critérios que avaliam a capacidade de evitar a propagação do arco entre os compartimentos, ou a proteção com alguma porta ou tampa aberta, pois esta condição se equipara a situações típicas da atividade de manutenção. Estes critérios são avaliados pelo relatório técnico IEC TR 61641 e pela norma IEEE Std C37.20.7 apenas.

Os conjuntos de manobra e comando são equipamentos vitais nos sistemas de distribuição industrial, possuem alto custo e a sua substituição não ocorre com frequência (via de regra, implica em parada de produção). Eles podem durar décadas, permanecendo com suas características originais, alheios à evolução da normatização técnica. Portanto, é fundamental que o pessoal de operação e manutenção compreenda os conceitos básicos que envolvem a proteção contra arco elétrico oferecida por conjuntos de manobra e comando, para realizar análises de riscos adequadas. Os conjuntos antigos, ainda muito comuns na indústria, não foram projetados para conter a energia de um arco elétrico, e os conjuntos novos, quando aprovados, oferecem proteção apenas sob certas condições.

³³ TTA: *Type-Tested Assemblies* (“conjuntos com ensaio de tipo totalmente testados”).

³⁴ PTTA: *Partially Type-Tested Assemblies* (“conjuntos com ensaio de tipo parcialmente testados”).

3.4.3.3 Equipamento de proteção individual (EPI)

Os EPIs contra arco elétrico são especificados através de um parâmetro chamado pela ASTM F1959/F1959M [29] de “Classificação de Arco”, definido como o valor atribuído aos materiais que descreve seu desempenho à exposição ao arco elétrico. A Classificação de Arco é indicada em cal/cm^2 , e o seu valor é obtido a partir da avaliação de duas características:

- **ATPV³⁵**: definido como a energia incidente em um material simples ou sistema multicamadas de materiais que resulta em uma probabilidade de 50% de que a transferência de calor através do espécime ensaiado seja suficiente para atingir o limiar de energia térmica para causar uma queimadura de segundo grau com base na curva de Stoll ($1,2 \text{ cal}/\text{cm}^2$) [15];
- **E_{BT}³⁶**: definido como a energia incidente em um material simples ou sistema multicamadas de materiais que resulta em uma probabilidade de 50% de que haja ruptura do material. É considerado que houve ruptura do material quando o espécime ensaiado apresentar uma abertura de pelo menos $1,6 \text{ cm}^2$ de área ou pelo menos 2,5 cm de comprimento em qualquer dimensão.

O menor valor entre o ATPV e o E_{BT} determina o valor da Classificação de Arco, sendo que a informação de qual das duas características foi predominante deve constar no relatório ou certificado do material, *e.g.*, “Classificação de Arco (ATPV)” se a avaliação do ATPV resultou em valor mais baixo, ou “Classificação de Arco (E_{BT})” se foi a avaliação do E_{BT}. Ao EPI também pode ser atribuída uma categoria, conforme Quadro 3.4.

Quadro 3.4 – Categorias de EPI conforme NFPA 70E-2021.

Categoria de EPI	Classificação de Arco mínima
1	4 cal/cm^2
2	8 cal/cm^2
3	25 cal/cm^2
4	40 cal/cm^2

A NFPA 70E-2021 define dois métodos para a seleção de EPI contra arco elétrico:

- **Método do Cálculo da Energia Incidente:** Consiste em selecionar um EPI cuja Classificação de Arco seja igual ou superior à energia incidente calculada para o serviço a ser executado;
- **Método da Categoria de EPI:** Consiste em enquadrar as características do sistema elétrico sob análise nas situações listadas nas tabelas da NFPA 70E-2021, e selecionar um EPI cuja categoria seja igual ou superior à Categoria de EPI indicada.

³⁵ ATPV: *Arc Thermal Performance Value* (“valor de desempenho térmico ao arco”).

³⁶ E_{BT}: *Breakopen Threshold Energy* (“limite de energia de ruptura”).

Segundo a NFPA 70E-2021, o método de seleção de EPI deve corresponder ao método de avaliação da severidade empregado, conforme indicado no Quadro 3.5, não sendo permitida utilização de forma diferente.

Quadro 3.5 – Métodos de avaliação de severidade vs. métodos de seleção de EPI.

Método empregado para avaliação da severidade	Método permitido para seleção de EPI
Cálculo de Energia Incidente	Classificação de Arco (cal/cm ²)
Determinação direta da Categoria de EPI necessária através da correspondência com os sistemas listados nas tabelas 130.7(C)(15)(a) e 130.7(C)(15)(b) da NFPA 70E-2021 ³⁷	Categoria de EPI (1 a 4)

Apesar da ênfase dada pela NFPA 70E-2021, esta orientação não é seguida à risca pela indústria, onde é comum encontrar empresas que contam com cálculo de energia incidente e os EPIs são especificados por categorias. A maioria dos EPIs disponíveis no mercado informam tanto a sua Classificação de Arco (cal/cm²) quanto a sua Categoria (1 a 4).

O Método da Categoria de EPI foi o primeiro método proposto [14], e teve sua relevância numa época em que o arco elétrico não era um perigo plenamente reconhecido, havia pouco conhecimento de como avaliá-lo e as opções de equipamentos de proteção eram limitadas. Na época, os números que identificavam as categorias faziam referência à quantidade de camadas que um sistema de vestimentas antichamas normalmente necessitava para oferecer proteção adequada quando submetido a um nível de energia incidente dentro da respectiva faixa. Nos últimos anos, houve evolução tanto nos métodos de cálculo de energia incidente, quanto no desempenho dos materiais antichamas, o que inclusive tornou inconsistente a relação entre o número que identifica cada categoria e a quantidade real de camadas de vestimenta (*e.g.* a maioria das vestimentas antichamas atuais consegue atingir o desempenho da Categoria 2 com apenas uma camada).

Hoje em dia, o Método da Categoria de EPI pode ser considerado desvantajoso, pois contém fatores de segurança extremamente conservadores que acabam, na maioria das situações, penalizando o executante por indicar EPIs com nível de proteção mais altos que o necessário, desconfortáveis e, por vezes, inviáveis para a tarefa proposta. O cálculo da energia incidente permite a seleção de um EPI otimizado, considerando a sua Classificação de Arco.

³⁷ Estas tabelas constam nos Anexos A.2 e A.3.

3.4.4 Medidas baseadas na mitigação de danos – Medidas ativas

3.4.4.1 Redução da corrente de arco

Como a corrente de arco depende fortemente da corrente de curto-circuito, as técnicas tradicionais para limitação da corrente de curto-circuito nas instalações elétricas industriais atendem a este objetivo. Entre elas, pode-se citar:

- Aplicação de fusíveis limitadores (atuam na corrente e no tempo);
- Aplicação de dispositivos pirotécnicos;
- Aplicação de reatores;
- Aplicação de múltiplos transformadores de distribuição de menor porte, no lugar de um transformador de grande porte;
- Impedimento da operação em modo de paralelismo de transformadores, no caso de sistemas de potência redundantes.

Entretanto, a diminuição da energia incidente através da limitação da corrente de arco impõe alguns desafios. Primeiramente, a aplicação das medidas relacionadas nem sempre são viáveis. Algumas delas só podem ser implementadas se previstas durante a fase de projeto da instalação, ou no mínimo requerem adaptações custosas. Além disso, existe a possibilidade de que a limitação da corrente de arco não cause o efeito desejado e, pelo contrário, piore a energia incidente presumida. Este cenário se deve ao fato de que a energia incidente é dependente, entre outros fatores, da magnitude da corrente de arco e da sua duração. Se a redução da corrente de arco provocar, por ação de elementos de proteção de característica tempo inverso, o aumento da duração de arco, o resultado pode ser pior do que com a corrente de arco de maior magnitude. Portanto, a limitação da corrente de arco deve ser cuidadosamente analisada.

3.4.4.2 Redução da duração de arco – Redução do tempo de operação da proteção

O sistema elétrico industrial é tipicamente radial, com a maior parte da sua proteção baseada em funções de sobrecorrente.

Geralmente, o dispositivo de proteção contra curto-circuito mais próximo da carga não possui atraso intencional no seu ajuste, ou possui um atraso muito pequeno para evitar atuações indevidas. Para que, na ocorrência de uma falta na carga, somente o dispositivo de proteção mais próximo da falta atue, o dispositivo de proteção à montante deste do último nível precisa ter um atraso intencional suficiente para que o dispositivo mais próximo da falta consiga eliminar o curto-circuito, evitando a atuação concomitante.

Da mesma maneira, se houver outros níveis à montante, mais atrasos intencionais precisam ser adicionados para manter a seletividade entre dispositivos de proteção em série. Este esquema tradicional é chamado de “seletividade cronométrica”, conforme ilustrado na Figura 3.3. Na literatura clássica de sistemas industriais, dos anos 50, o intervalo recomendado entre dispositivos de proteção eletromecânicos em série era da ordem de 400 ms [30]. Atualmente, com a aplicação de relés digitais, o intervalo deve ficar entre 200 e 300 ms.

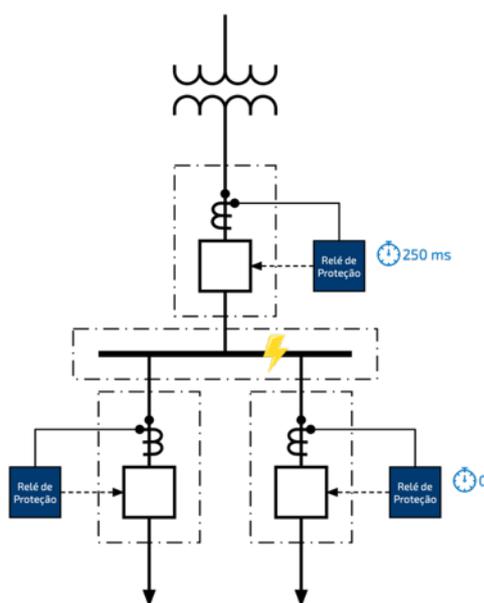


Figura 3.3 – Exemplo de esquema de seletividade cronométrica.

Se, por um lado, a continuidade operacional é um benefício desta filosofia, por outro lado, a energia incidente nos níveis mais à montante do sistema de distribuição, que possuem maiores atrasos na atuação da proteção, pode chegar a níveis intoleráveis, preocupação que não existia há algumas décadas.

Para mitigar este problema, mantendo a seletividade (quando possível), que é uma das premissas do sistema de proteção industrial, pode-se fazer uso de algumas estratégias para reduzir o tempo de operação da proteção, entre elas:

- **Seletividade lógica:** Consiste no envio de um sinal de bloqueio da função de proteção por sobrecorrente do dispositivo à jusante, que tem prioridade de atuação, para o dispositivo à montante, que está temporizado, conforme ilustrado na Figura 3.4. Isso permite reduzir o intervalo de tempo entre os dispositivos de sobrecorrente em série para valores entre 50 e 100 ms, contribuindo para a redução da energia incidente no barramento à montante. O tempo deve ser suficiente para que, no caso de uma sobrecorrente que sensibilize os dois dispositivos, o relé à jusante identifique a falta, acione um contato de saída, e o sinal seja lido e processado pelo relé à montante, que deve bloquear a sua atuação até que o dispositivo mais perto da falta a elimine. Se implementado através de uma rede de automação, como a baseada na norma IEC 61850, os intervalos podem baixar de 50 ms;

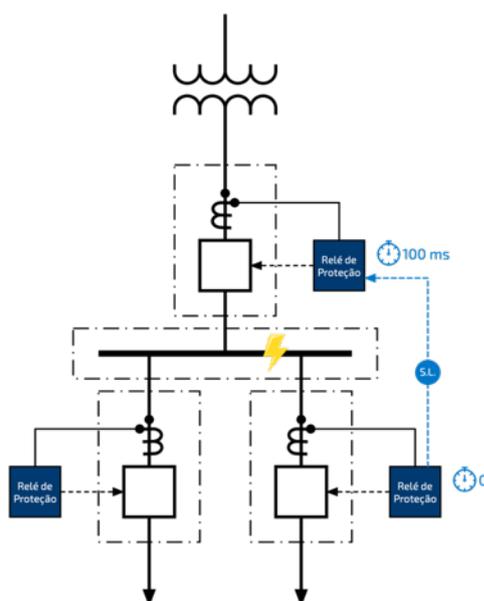


Figura 3.4 – Exemplo de esquema de seletividade lógica.

- **Perda temporária de seletividade:** Consiste em eliminar qualquer atraso intencional da função de sobrecorrente do dispositivo de proteção à montante do ponto onde haverá uma intervenção com exposição ao arco elétrico. Esta ação leva à perda da seletividade enquanto o ajuste da proteção de sobrecorrente permanecer sem atraso intencional, um risco assumido que pode ser considerado um bom *trade-off*³⁸ em nome da segurança pessoal. Esta mudança de parâmetros é facilitada em relés digitais, que normalmente possuem grupos de ajuste que podem ser comutados com o acionamento de uma entrada digital, conforme ilustrado na Figura 3.5, onde a posição “O” significa “Operação” e a posição “M” significa “Manutenção”. Esta técnica também é chamada de método da “chave de manutenção” ou dos “grupos de ajuste”. É recomendado implementar alarmes ou ter procedimentos efetivos para evitar o esquecimento de se retornar o ajuste para o valor original após o final da intervenção;

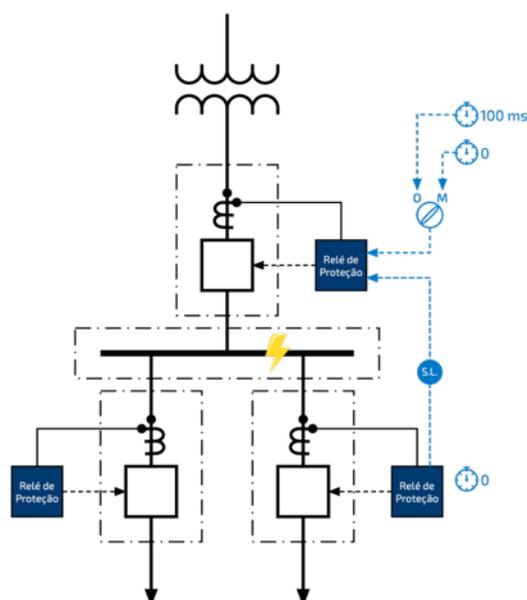


Figura 3.5 – Exemplo de esquema com perda temporária de seletividade.

³⁸ *Trade-off*: Expressão em inglês que significa “abrir mão de uma coisa em troca de outra”.

- **Relé diferencial de barras:** É uma proteção que não depende de seletividade cronométrica com as funções de sobrecorrente. Possui operação rápida, o que é eficaz para a redução da energia incidente, porém requer que todas as entradas e saídas da barra sejam monitoradas, o que faz com que a sua implementação nem sempre seja viável, principalmente em conjuntos de manobra e comando industriais, que podem possuir múltiplas entradas e saídas. Pode ser de dois tipos:
 - Baixa impedância (87B): Não requer a aplicação de TCS³⁹ exclusivos, e a proteção é dada através da combinação das correntes de operação e de restrição, em comparação com uma característica em forma de rampa;
 - Alta impedância (87Z): Requer a aplicação de TCS dedicados, que são paralelados para que a corrente diferencial cause uma queda de tensão na entrada do relé, que é a grandeza monitorada.

A Figura 3.6 apresenta exemplos desses esquemas.

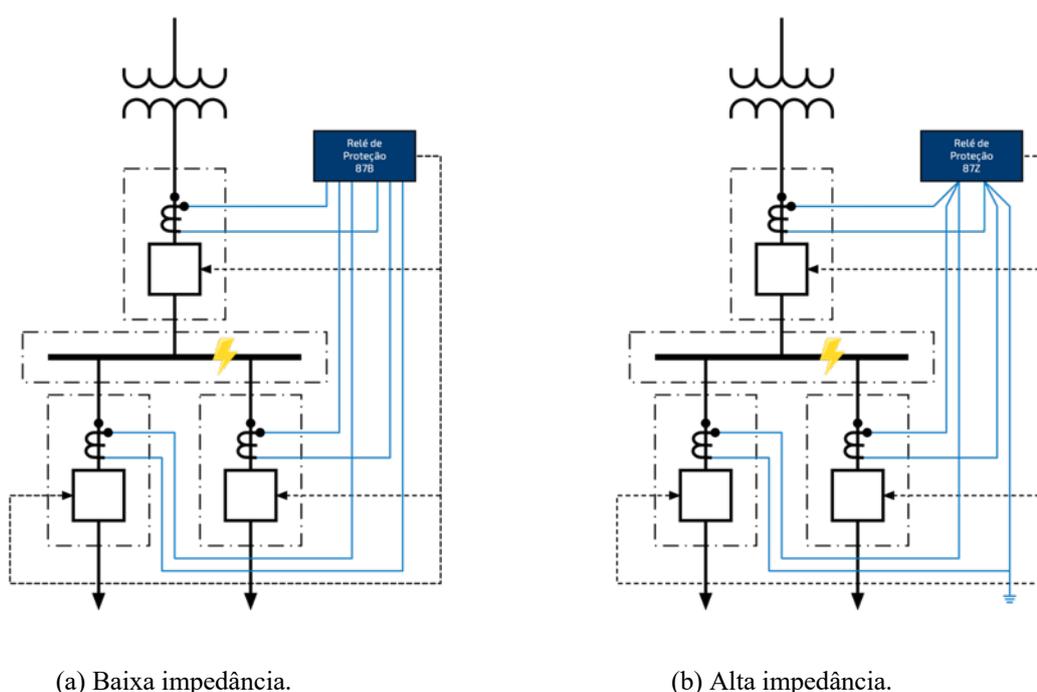


Figura 3.6 – Exemplo de esquema com relé diferencial de barras.

³⁹ TC: Transformador de Corrente.

- **Relé de arco:** Utiliza a luz como principal grandeza para detecção do arco, e algoritmos rápidos de medição de corrente para confirmação. Não precisa ser seletivo com as funções de sobrecorrente, e possui tempo de operação muito reduzido (≈ 2 ms) com o uso de saídas com interruptor estático, mais rápidas que as saídas com relé auxiliar eletromecânico. Pode ser um relé dedicado ou um relé multifunção com a função de arco incorporada. Os sensores podem ser de dois tipos:
 - Sensor pontual: Capta a luz de uma região bem delimitada. Para monitorar vários compartimentos, são necessários vários sensores e também um relé de arco com capacidade para monitorar todos esses pontos, ou então deve-se utilizar vários relés. Por esse motivo, a aplicação de sensores pontuais pode não ser vantajosa em conjuntos de manobra e comando com muitas unidades funcionais. Por outro lado, a característica pontual permite identificar mais precisamente o local do arco, viabilizando a criação de lógicas para desligamentos seletivos, além de facilitar a inspeção para localização do defeito;
 - Sensor regional: Composto por uma fibra óptica desencapada, que sai de um terminal do relé de arco, passa pelos compartimentos do conjunto de manobra e comando, e pode retornar para outro terminal do mesmo relé. Uma única fibra pode ter até dezenas de metros de comprimento, e capta luz por toda a extensão exposta, o que torna este tipo de sensor adequado para conjuntos de manobra e comando com muitos compartimentos. Como desvantagem, não permite identificar em qual parte da fibra (ou em qual compartimento) foi captada a luz que sensibilizou o detector. Quando as duas pontas da fibra são conectadas ao relé, pode haver monitoramento da integridade do *loop*.

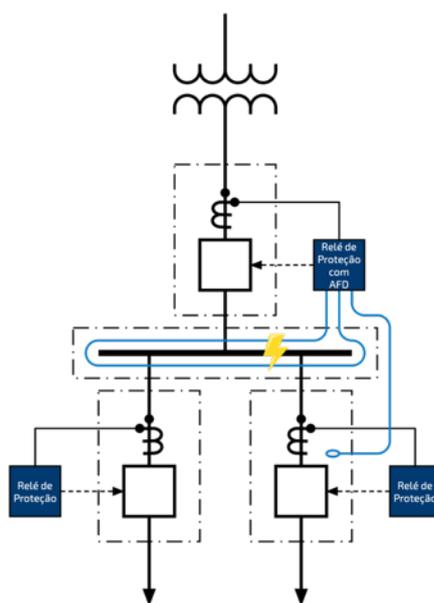


Figura 3.7 – Exemplo de esquema com relé de arco.

3.4.4.3 Redução da duração de arco – Extinção de arco

Apesar da evolução tecnológica que permitiu a redução do tempo de detecção/operação da proteção contra arco elétrico para valores da ordem de 2 ms com os relés de arco, a eficácia desta estratégia se deparou com um gargalo: o tempo de atuação do disjuntor, dispositivo responsável por eliminar o arco, que fica na faixa de 3 a 5 ciclos (50 a 80 ms).

O método mais moderno e eficaz para a redução da energia incidente é a aplicação do chamado dispositivo de extinção de arco, conhecido pela sigla AQD⁴⁰. Na ocorrência de um arco elétrico dentro da sua zona de proteção, o AQD cria um caminho de corrente paralelo, de baixa impedância, transferindo a corrente de arco para o dispositivo e provocando a extinção do arco original pela redução da tensão que o sustentava.

Atualmente, existem vários sistemas de extinção de arco disponíveis comercialmente. Apesar dos diferentes métodos para a geração de uma corrente paralela, as topologias e as lógicas de funcionamento são similares, podendo ser descritas através das etapas ilustradas na Figura 3.8.

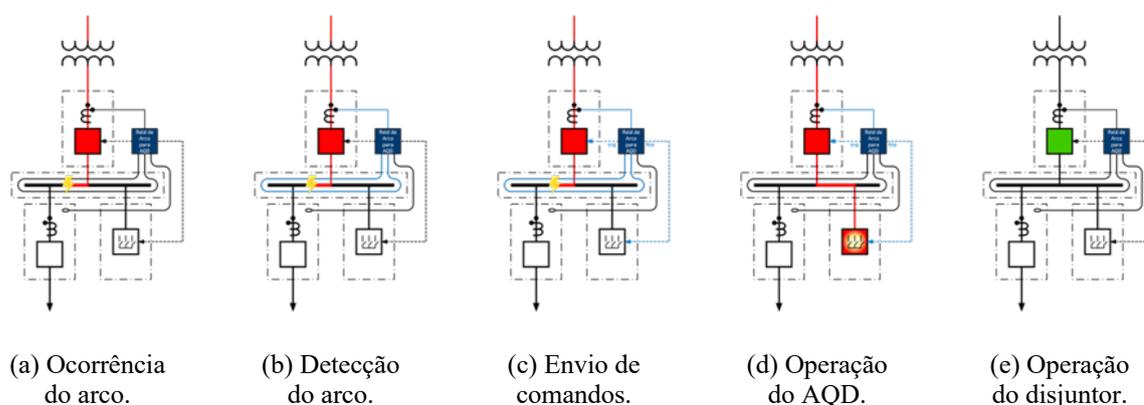


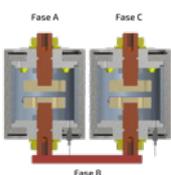
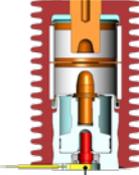
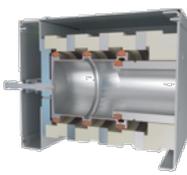
Figura 3.8 – Etapas da operação de um AQD.

- (a) Ocorrência do arco elétrico dentro da zona de proteção do AQD;
- (b) Detecção do arco através de sensores de luz e corrente;
- (c) Envio simultâneo, pelo relé dedicado, de comando de disparo do AQD e de comando de abertura do disjuntor à montante, caso o pickup tenha sido atingido;
- (d) Atuação do dispositivo de extinção de arco, transferindo a corrente de arco para o AQD, eliminando o arco original;
- (e) Atuação do disjuntor à montante (o tempo de atuação do disjuntor não influi no valor da energia incidente).

⁴⁰ AQD: *Arc Quenching Device* (“dispositivo de extinção de arco”).

O AQD pode ou não necessitar de um relé de arco específico para o dispositivo utilizado, pois cada fabricante possui uma tecnologia própria, variando o tipo de sinal de disparo. O Quadro 3.6 apresenta um resumo das características de alguns modelos comerciais.

Quadro 3.6 – Características de alguns AQDs comerciais.

Fabricante	GE	Eaton	ABB	Arcteq	Siemens
Nome comercial	Arc Vault™	AQD	UFEST™	AQ 1000/2000	SIQuench®
Imagem					
Método de extinção do arco	Arco secundário	Arco secundário	Curto-circuito sólido	Curto-circuito sólido	Curto-circuito sólido
Tecnologia de disparo do AQD	Arco provocado pelo disparo de uma pistola de plasma que quebra a rigidez dielétrica do <i>air gap</i> entre eletrodos	Arco provocado pelo contato momentâneo de uma fita-gatilho, acionada por efeito “força de Lorentz”	Contatos fechados por pistão impulsionado pela detonação de um microgerador de gás (“ <i>air bag</i> ”)	Contatos fechados por atuador mecânico acionado eletricamente por efeito “anel de Thomson”	Contatos fechados por atuador mecânico acionado eletricamente por conjunto solenoide-mola
Operação do relé	Não informado	2 ms	2,5 ms	2 ms	Não informado
Operação do AQD	Não informado	2 ms	1,5 ms	3-4 ms	Não informado
Duração total do arco	8 ms	4 ms	4 ms	5-6 ms	5 ms
Energia máxima estimada	< 1,2 cal/cm ²	< 1,2 cal/cm ²	< 1,0 cal/cm ²	< 1,0 cal/cm ²	Não declarada
Quantidade de operações	Uso único	Uso único	Uso único	Reiniciável (2 operações)	Reiniciável (5 operações)
Referência	[31]	[32]	[33]	[34]	[35]

Com uma duração de arco entre $\frac{1}{4}$ e $\frac{1}{2}$ ciclo, e energia incidente abaixo de 1,2 cal/cm², um sistema com AQD oferece proteção pessoal mesmo com os compartimentos abertos, e reduz os danos ao conjunto de manobra e comando, o que pode proporcionar um restabelecimento operacional mais rápido. Também torna desnecessário que o conjunto de manobra e comando possua dutos de exaustão, pois a rápida atuação minimiza a formação de gases tóxicos. Os AQDs que geram arco secundário devem conter os gases gerados em uma câmara apropriada. Contudo, a instalação de um AQD pode requerer o espaço equivalente a um cubículo extra, portanto, é aplicável a conjuntos de manobra e comando novos, ou antigos mediante *retrofit*. Pelo fato de ser de uso único, ou no máximo poucas operações, há uma dificuldade para a realização de testes. As normas de referência são a IEC 60947-9-1 [36] e a UL 2748 [37].

Com base em consultas realizadas a alguns fabricantes europeus de AQD com representação no Brasil na época da elaboração desta dissertação, estima-se que 80% dos fornecimentos nos últimos três anos tiveram como destino a Europa, 10% os EUA, e os 10% restantes foram distribuídos entre diversos países, com poucos registros de aplicações no Brasil. O custo estimado de um sistema AQD no Brasil varia entre € 15.000 e € 50.000 por conjunto de manobra e comando, dependendo do modelo aplicado e das especificações do projeto.

3.4.4.4 Comparativo entre medidas para redução da duração de arco

O Quadro 3.7 apresenta um comparativo entre o desempenho dos métodos de mitigação baseados na redução da duração de arco. Os valores indicados não se referem a nenhum modelo específico, nem definem os limites de desempenho de cada método, mas tentam dar uma ideia de valores típicos de cada tecnologia.

Quadro 3.7 – Comparação entre métodos de redução de duração de arco.

Tipo de sensor	Esquema	Dispositivo de interrupção ou extinção	Deteção e operação	Atraso intencional	Interrupção ou extinção	Duração de arco típica
Corrente	Seletividade cronométrica	Disjuntor	25 ms	200-300 ms [média 250 ms]	50-80 ms [média 65 ms]	340 ms
Corrente	Seletividade lógica	Disjuntor	25 ms	50-100 ms [média 75 ms]	50-80 ms [média 65 ms]	165 ms
Corrente	Chave de manutenção	Disjuntor	25 ms	0	50-80 ms [média 65 ms]	90 ms
Corrente	Diferencial de barras	Disjuntor	25 ms	0	50-80 ms [média 65 ms]	90 ms
Luz e corrente	Relé de arco	Disjuntor	2-8 ms [média 5 ms]	0	50-80 ms [média 65 ms]	70 ms
Luz e corrente	Relé de arco dedicado	AQD	2 ms	0	2-4 ms [média 3 ms]	5 ms

As estratégias para redução da duração de arco pela redução do tempo de operação de dispositivos de proteção proporcionam um ganho de segurança em relação ao sistema clássico de seletividade cronométrica. No entanto, mesmo com a aplicação dos relés de arco com detecção através de sensores de luz e algoritmos rápidos de sobrecorrente, possuem eficácia limitada, pois não têm influência no tempo de operação do disjuntor, que é o dispositivo responsável pela eliminação do arco.

Os AQDs representam uma grande inovação para a segurança elétrica, pois eliminam o “gargalo” do disjuntor convencional. O disjuntor continua sendo necessário para interrupção da corrente de falta, porém seu tempo de operação não influencia na energia incidente uma vez que o arco já foi extinto pelo AQD.

A Figura 3.9 ilustra de uma maneira gráfica os valores do Quadro 3.7, deixando mais evidente o impacto de cada tecnologia na redução da energia incidente.

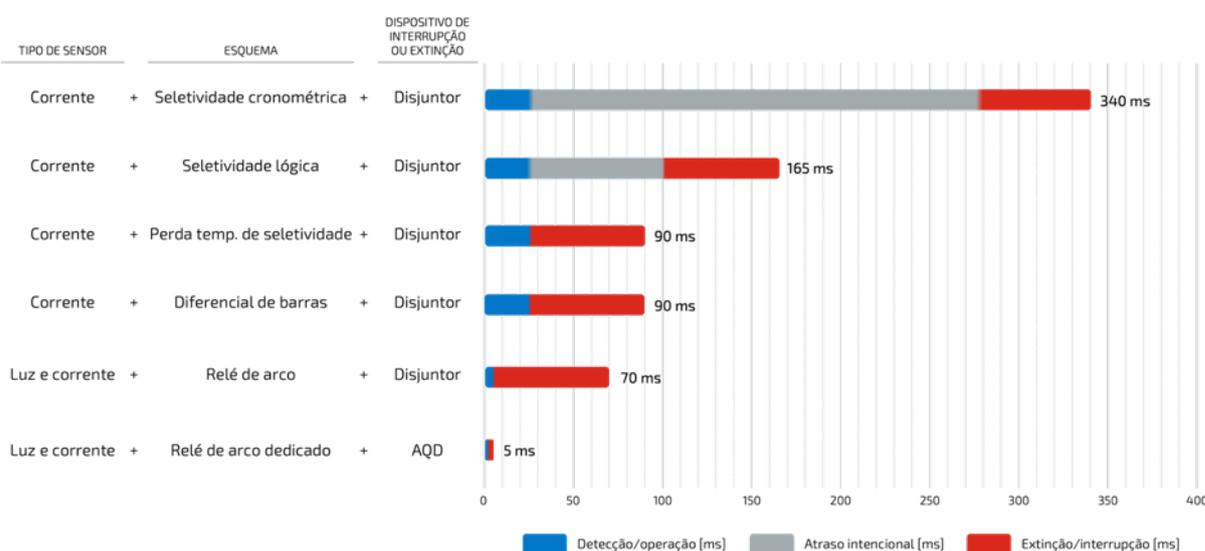


Figura 3.9 – Comparativo entre métodos de redução de duração de arco (gráfico).

3.5 Considerações finais

Este capítulo apresentou o estudo de energia incidente como um elemento essencial dentro do processo de análise de riscos, necessário para quantificar a severidade dos efeitos de um arco elétrico.

Diferentemente do risco de choque elétrico, cujas recomendações de segurança podem ser emitidas sem necessidade de cálculos (*e.g.* para uma intervenção em circuito energizado de 220 V deve-se utilizar luvas isolantes Classe 00⁴¹, conforme NBR 16295 [38]), um estudo de energia incidente é necessário tanto para a correta especificação de um EPI contra arco elétrico, quanto para averiguar a eficácia das medidas de controle baseadas na mitigação de danos adotadas.

⁴¹ Luvas isolantes de borracha Classe 00 são indicadas para proteção contra choques elétricos em sistemas energizados com tensão até 500 V, conforme NBR 16295.

4 O MÉTODO IEEE STD 1584-2018

4.1 Considerações iniciais

Um estudo de energia incidente de arco elétrico, de maneira geral, pode ser representado pelo processo ilustrado na Figura 4.1.

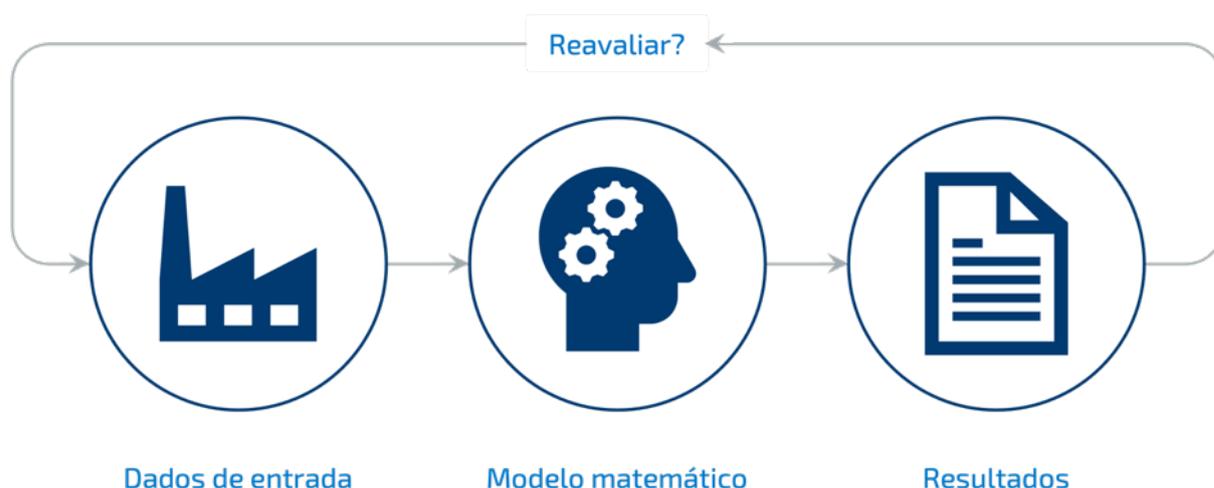


Figura 4.1 – Etapas de um estudo de energia incidente.

De acordo com o método, os dados de entrada podem incluir parâmetros elétricos, operacionais ou mesmo construtivos. O modelo matemático pode ser teórico ou experimental. O principal resultado é a energia incidente, complementado pelo limite de aproximação segura. A Figura 4.1 também sugere que o estudo deva ser reavaliado de tempos em tempos.

Este capítulo apresenta, inicialmente, uma visão geral do método IEEE Std 1584-2018 e as principais características do modelo matemático. Na sequência, serão discutidos os principais parâmetros do método, incluindo os dados de entrada, parâmetros intermediários (calculados) e resultados⁴².

4.2 Visão geral do método

A Figura 4.2 ilustra, esquematicamente, os conceitos básicos de um estudo de energia incidente pelo método IEEE Std 1584-2018.

⁴² Não é objetivo do capítulo reproduzir todas as informações e exceções da norma. Para a aplicação do método, a norma deve ser a referência consultada.

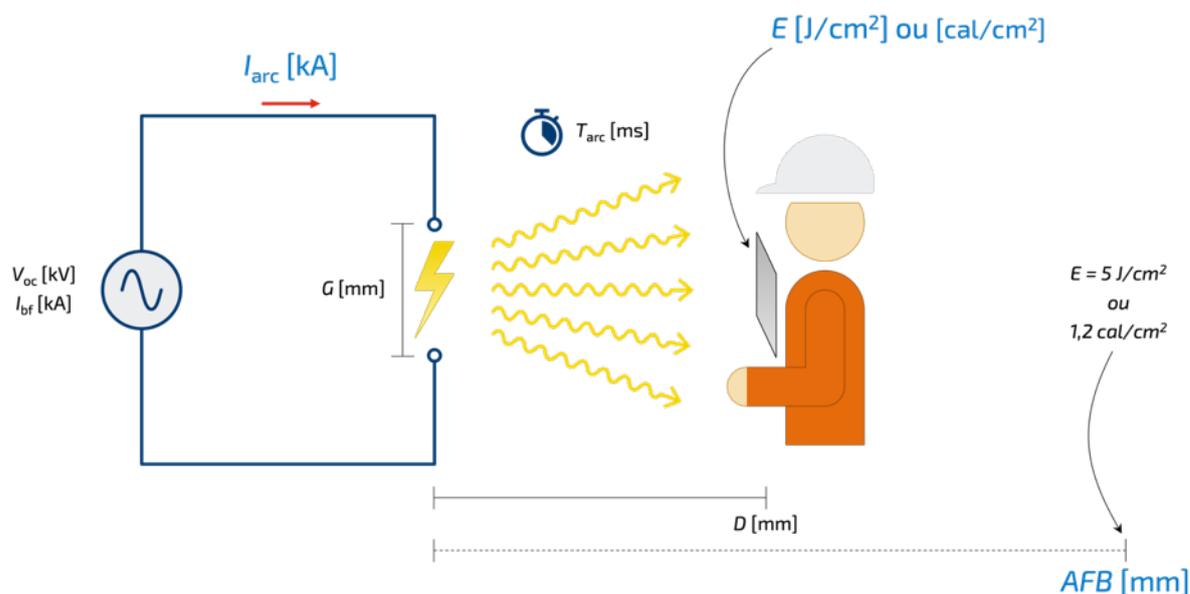


Figura 4.2 – Representação conceitual método IEEE Std 1584-2018.

Seja uma instalação elétrica que possui uma tensão de circuito aberto (V_{oc}) e uma corrente de falta franca (I_{bf}) definida através de um estudo de curto-circuito. Se, em alguma parte desta instalação, dois pontos energizados com potenciais diferentes (fase-fase) estiverem separados por uma distância (G) relativamente pequena, e isolados apenas pelo ar, um arco elétrico poderá ser iniciado se houver uma ruptura dielétrica. Quando isto ocorrer, o arco elétrico drenará da fonte uma corrente de arco (I_{arc}), que terá um valor menor do que o da corrente de falta franca, em função da impedância do arco. A corrente de arco é o primeiro parâmetro estimado pelo modelo matemático da IEEE Std 1584-2018.

Uma vez iniciado, e enquanto o sistema elétrico sustentá-lo, o arco elétrico irá liberar calor ao seu entorno. Se houver um trabalhador posicionado a uma distância de trabalho (D) do arco, e se este trabalhador permanecer nesta posição por toda a duração de arco (T_{arc}), ele receberá uma quantidade de energia térmica definida como energia incidente (E), sendo este o segundo parâmetro estimado pelo modelo matemático da IEEE Std 1584-2018.

O método também define que deva ser calculada a distância do arco na qual a energia incidente é equivalente a 1,2 cal/cm², valor que é considerado o limiar de energia térmica a partir do qual uma pessoa pode sofrer queimaduras de segundo grau na sua pele, se desprotegida. Esta distância é conhecida como limite de aproximação segura (AFB), e é o terceiro e último parâmetro estimado pelo modelo matemático da IEEE Std 1584-2018.

Os modelos matemáticos da IEEE Std 1584-2018 foram desenvolvidos empiricamente, sendo baseados tanto em análises estatísticas e ajustes de curvas de dados de ensaios, como também no entendimento sobre a física do arco elétrico.

Uma característica importante verificada nos ensaios é que a corrente de arco é instável, podendo variar dentro de uma faixa de valores. Se a proteção responsável por eliminar o arco for baseada em elemento de sobrecorrente com curva do tipo tempo inverso, uma corrente de arco de menor intensidade pode resultar em uma duração de arco mais longa e eventualmente maior energia incidente. Um dos pontos chave da avaliação de energia incidente é que o maior valor de corrente de arco não implica necessariamente no pior caso de energia incidente. Deste modo, o método estabelece que devam ser avaliadas duas condições:

- i. Calcular a corrente de arco plena ou máxima (I_{arcmax}), avaliar a duração de arco provocada por esta corrente (T_{Iarcmax}) e em seguida calcular a energia incidente (E_{Iarcmax}) e o limite de aproximação segura (AFB_{Iarcmax}) com estes parâmetros; e,
- ii. Calcular a corrente de arco reduzida ou mínima (I_{arcmin}), avaliar a duração de arco provocada por esta corrente (T_{Iarcmin}) e em seguida calcular a energia incidente (E_{Iarcmin}) e o limite de aproximação segura (AFB_{Iarcmin}) com estes parâmetros.

A corrente de arco mínima é calculada a partir de um fator de correção de variação de corrente ($VarC_f$) aplicado à corrente de arco máxima, sendo que este fator de correção depende basicamente da tensão de circuito aberto do sistema (quanto menor a tensão do sistema, maior a faixa de variação). Os valores de energia incidente e de limite de aproximação segura são ajustados para as dimensões do compartimento real através do fator de correção para o tamanho do invólucro (CF). O pior resultado entre as duas condições deve ser considerado o resultado do estudo.

A Figura 4.3 ilustra o fluxograma do método.

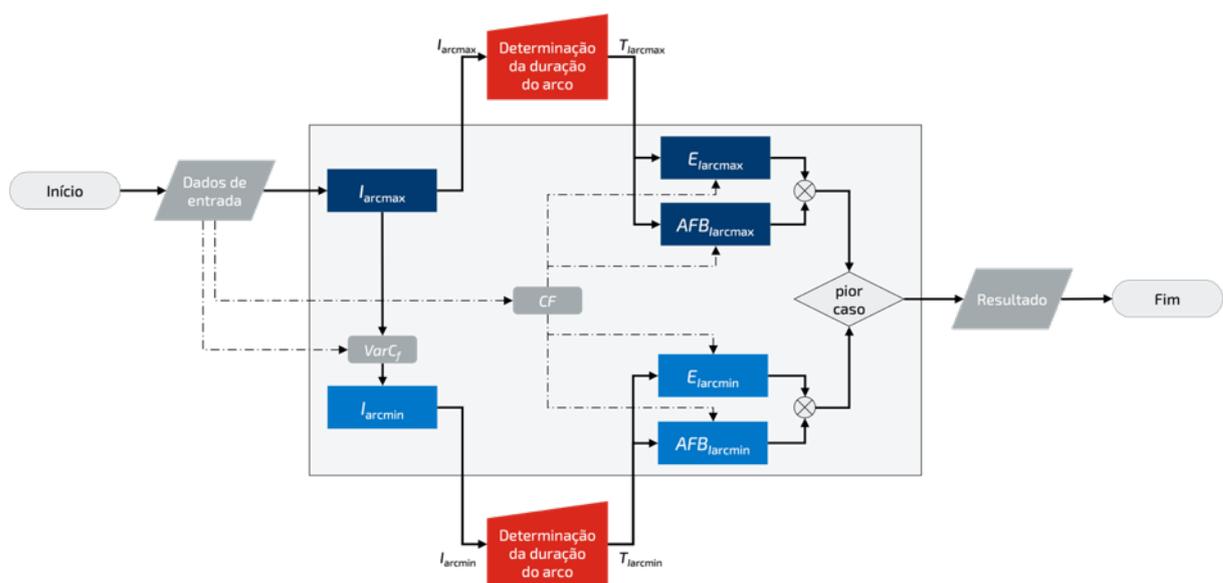


Figura 4.3 – Fluxograma do método IEEE Std 1584-2018.

Vale ressaltar que a avaliação da duração do arco é uma tarefa “externa” ao modelo. Este parâmetro deve ser definido com base no Estudo de Seletividade da Proteção, complementado pelo diagrama funcional e pela especificação técnica (tempos operacionais) dos dispositivos utilizados.

As três principais grandezas calculadas (I_{arc} , E e AFB) são determinadas em dois passos, onde primeiro são calculados valores intermediários referidos às tensões padronizadas de ensaio (600, 2.700 e 14.300 V), e em seguida estes valores intermediários são interpolados para se obter os valores finais referidos à tensão do sistema real (V_{oc}). Há um modelo matemático para a faixa de tensão de circuito aberto entre 208 e 600 V, e outro para a faixa acima de 600 V até 15 kV. O motivo de terem sido estabelecidos dois modelos matemáticos foi a dificuldade de se modelar a corrente de arco para tensões de circuito aberto abaixo de 600 V, em função do comportamento dinâmico e instável do arco elétrico. Foi observado que a resistência por centímetro de arco aumenta com a diminuição da tensão de circuito aberto, efeito compensado pela menor força eletromagnética para reduzir o comprimento do arco, o que levou o grupo de trabalho a assumir que a resistência do arco pode ser considerada constante na faixa de tensão de circuito aberto entre 208 e 600 V. Assim, o modelo para sistemas até 600 V estima a corrente de arco para uma determinada tensão nominal a partir da corrente de arco em 600 V apenas, interpolando até zero. O modelo empírico é aplicável dentro das seguintes faixas de parâmetros:

- Tensão entre 208 V e 15.000 V (trifásica, fase-fase);
- Frequência de 50 Hz ou 60 Hz;
- Corrente de falta franca (simétrica eficaz):
 - 208 V a 600 V: 500 A a 106 kA;
 - 601 V a 15.000 V: 200 A a 65 kA.
- Espaçamento entre eletrodos:
 - 208 V a 600 V: 6,35 mm a 76,2 mm (0,25 in a 3 in);
 - 601 V a 15.000 V: 19,05 mm a 254 mm (0,75 in a 10 in).
- Distância de trabalho maior ou igual a 305 mm (12 in);
- Tempo de falta sem limite;
- Dimensões do invólucro:
 - Altura ou largura máximas: 1.244,6 mm (49 in);
 - Área de abertura máxima: 1,549 m² (2401 in²);
 - Largura mínima: quatro vezes o espaçamento entre condutores.
- Configurações de eletrodo conforme 4.3.1.3.

Por fim, cabe o registro de que alguns parâmetros foram desprezados pelo modelo, pois chegou-se à conclusão de que eles têm pouco ou nenhum efeito na corrente de arco e na energia incidente resultante, com base na análise dos dados de ensaios:

- frequência;
- tipo de aterramento;
- relação X/R ;
- material dos eletrodos.

4.3 Discussão sobre os principais parâmetros

4.3.1 Dados de entrada

4.3.1.1 Tensão de circuito aberto (V_{oc})

Nas equações apresentadas, o parâmetro tensão é sempre referido como V_{oc} , ou tensão de circuito aberto (*open-circuit voltage*), pois é o termo que reflete mais adequadamente a condição ensaiada em laboratório. Contudo, o modelo admite a utilização de outros valores de tensão, como a tensão pré-falta do sistema ou outro valor operacional de interesse.

4.3.1.2 Corrente de falta franca (I_{bf})

A corrente de falta franca, ou I_{bf} (*bolted fault current*), é definida como sendo “a máxima corrente que o sistema de potência pode fornecer através de um determinado circuito para qualquer curto-circuito de impedância desprezível aplicado em um determinado ponto ou em qualquer outro ponto que faça com que a corrente mais alta flua através do ponto especificado”.

O primeiro aspecto importante deste parâmetro é que ele não é um dado nominal do sistema, mas sim o resultado de um estudo de curto-circuito, que deve ser previamente realizado e abranger todos os pontos em que a energia incidente deverá ser avaliada. Em segundo lugar, não existe um método único para o cálculo da corrente de curto-circuito. Além do método “abrangente” ou “ôhmico”, os métodos normativos seguem a dicotomia da normatização internacional (ANSI vs. IEC). A IEEE Std 1584-2018 cita nominalmente a IEEE Std 551 [39] e a IEC 60909-0 [40], e admite a utilização de ambas. A escolha entre um ou outro método é, na verdade, mais relevante para as outras finalidades, como o adequado dimensionamento da suportabilidade mecânica e da capacidade de interrupção dos equipamentos, cuja fabricação e ensaios seguem um dos dois grupos técnicos. Assim, a norma de cálculo de curto-circuito deve ser coerente com a norma de fabricação dos dispositivos utilizados.

Na literatura há trabalhos que comparam o resultado do cálculo da energia incidente utilizando a corrente de curto-circuito pela norma IEEE com o resultado utilizando a corrente de curto-circuito pela norma IEC. Em resumo, os trabalhos demonstram que ambos os métodos podem ser empregados, não havendo um método que sempre resulte em maior energia incidente. Os resultados podem variar, em alguns casos ligeiramente, em outros casos significativamente, dependendo de uma série de fatores [41].

4.3.1.3 Configuração de eletrodo (*E.C.*)

Na Edição de 2002 da IEEE Std 1584, o modelo desenvolvido permitia duas opções de cálculo: arco elétrico ao ar livre e arco elétrico dentro de invólucro. Em ambos os casos, os eletrodos dos ensaios foram posicionados verticalmente. Entretanto, nos anos que se seguiram, pesquisas demonstraram que a energia incidente é influenciada não somente pela existência ou não de invólucro no entorno do arco, mas também pela disposição dos eletrodos.

Durante a elaboração da nova versão da IEEE Std 1584, o grupo de trabalho realizou testes com outras disposições, resultando em três configurações de eletrodo (*E.C.*) adicionais, conforme indicado na Figura 4.4.

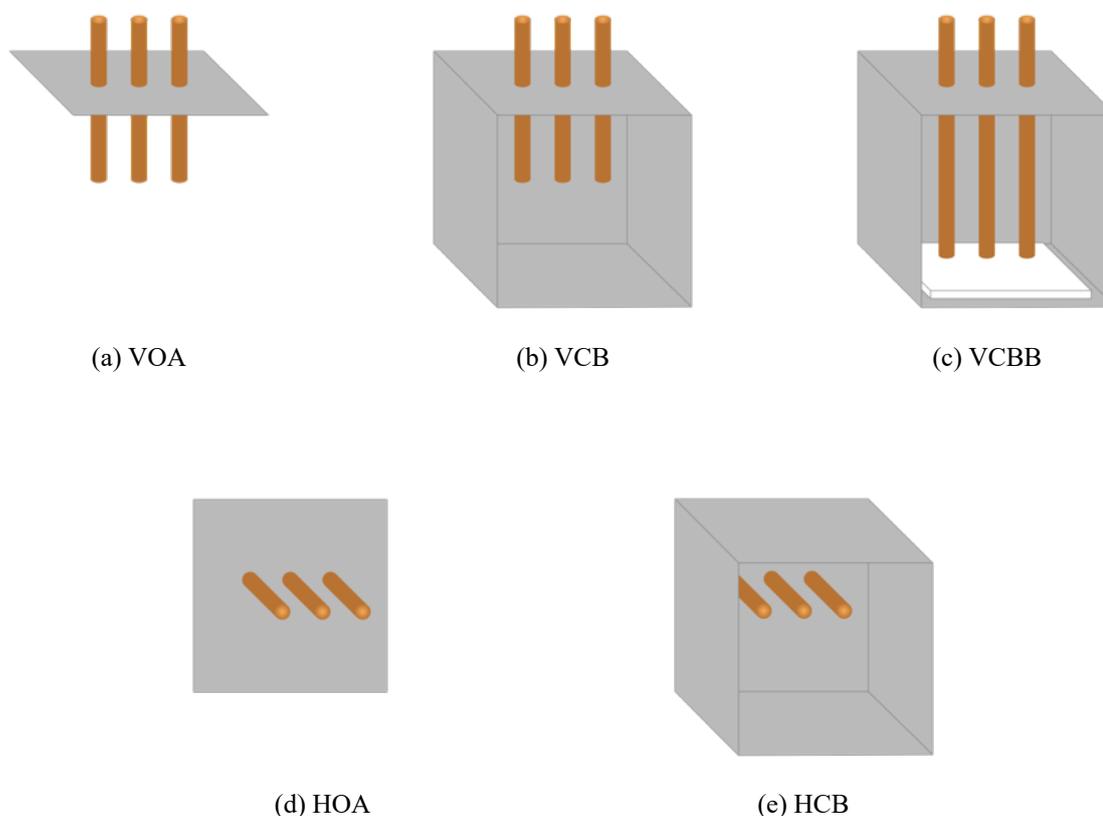


Figura 4.4 – Configurações de eletrodo.

A IEEE Std 1584-2018 também definiu acrônimos para as configurações:

- (a) **VOA**⁴³: Condutores/eletrodos verticais ao ar livre – existente na Edição 2002;
- (b) **VCB**⁴⁴: Condutores/eletrodos verticais dentro de invólucro metálico – existente na Edição 2002;
- (c) **VCBB**⁴⁵: Condutores/eletrodos verticais terminados em barreira isolante dentro de invólucro metálico;
- (d) **HOA**⁴⁶: Condutores/eletrodos horizontais ao ar livre;
- (e) **HCB**⁴⁷: Condutores/eletrodos horizontais dentro de invólucro metálico.

Segundo a física do arco elétrico, o arco se afasta da fonte, tendendo para as extremidades dos eletrodos. Isso significa que, nas configurações com eletrodos dispostos verticalmente, da maneira como foi definido pela norma, o arco elétrico será projetado para a parte inferior do arranjo. Na configuração VOA, a maior parte da energia irradiada será direcionada para baixo, enquanto o restante da energia térmica se propagará igualmente para todas as direções no entorno. Já na configuração VCB, a presença do invólucro metálico fará com que a nuvem de plasma seja direcionada para a abertura do invólucro, aumentando a energia incidente. Este efeito é amplificado na configuração VCBB, em que os eletrodos terminam próximo a uma barreira isolante. Nas configurações horizontais, HOA e HCB, o arco será projetado no sentido do trabalhador, supondo que ele se encontra na direção dos eletrodos. Deste modo, é esperado que estas configurações atinjam níveis de energia incidente mais elevados do que as configurações verticais, sendo a HCB, conceitualmente, a de maior severidade, pois soma o efeito do invólucro. Em todos os casos, a energia incidente estimada considera a exposição direta, *i.e.*, sem obstáculos entre o trabalhador e o arco, pois foi desta maneira que os ensaios foram conduzidos. Detalhes como a distância entre os eletrodos e a parede do fundo do invólucro, ou então a distância da ponta dos eletrodos até a base do invólucro, não foram parâmetros considerados no modelo desta edição da norma.

As formas construtivas das instalações reais podem diferir muito dos arranjos básicos. Nestes casos, o conhecimento dos fundamentos aqui discutidos é primordial para a escolha da configuração que permitirá a melhor estimativa de energia incidente. Sem este conhecimento, os acrônimos das configurações podem levar a escolhas equivocadas, uma vez que não basta saber a disposição dos eletrodos, mas sua posição em relação ao trabalhador.

⁴³ VOA: *Vertical conductors/electrodes in Open Air.*

⁴⁴ VCB: *Vertical conductors/electrodes inside a Cubic Box.*

⁴⁵ VCBB: *Vertical conductors/electrodes terminated in na insulating Barrier inside a Cubic Box.*

⁴⁶ HOA: *Horizontal conductors/electrodes in Open Air.*

⁴⁷ HCB: *Horizontal conductors/electrodes inside a Cubic Box.*

A Figura 4.5 ilustra a influência de cada configuração de eletrodo na energia incidente.

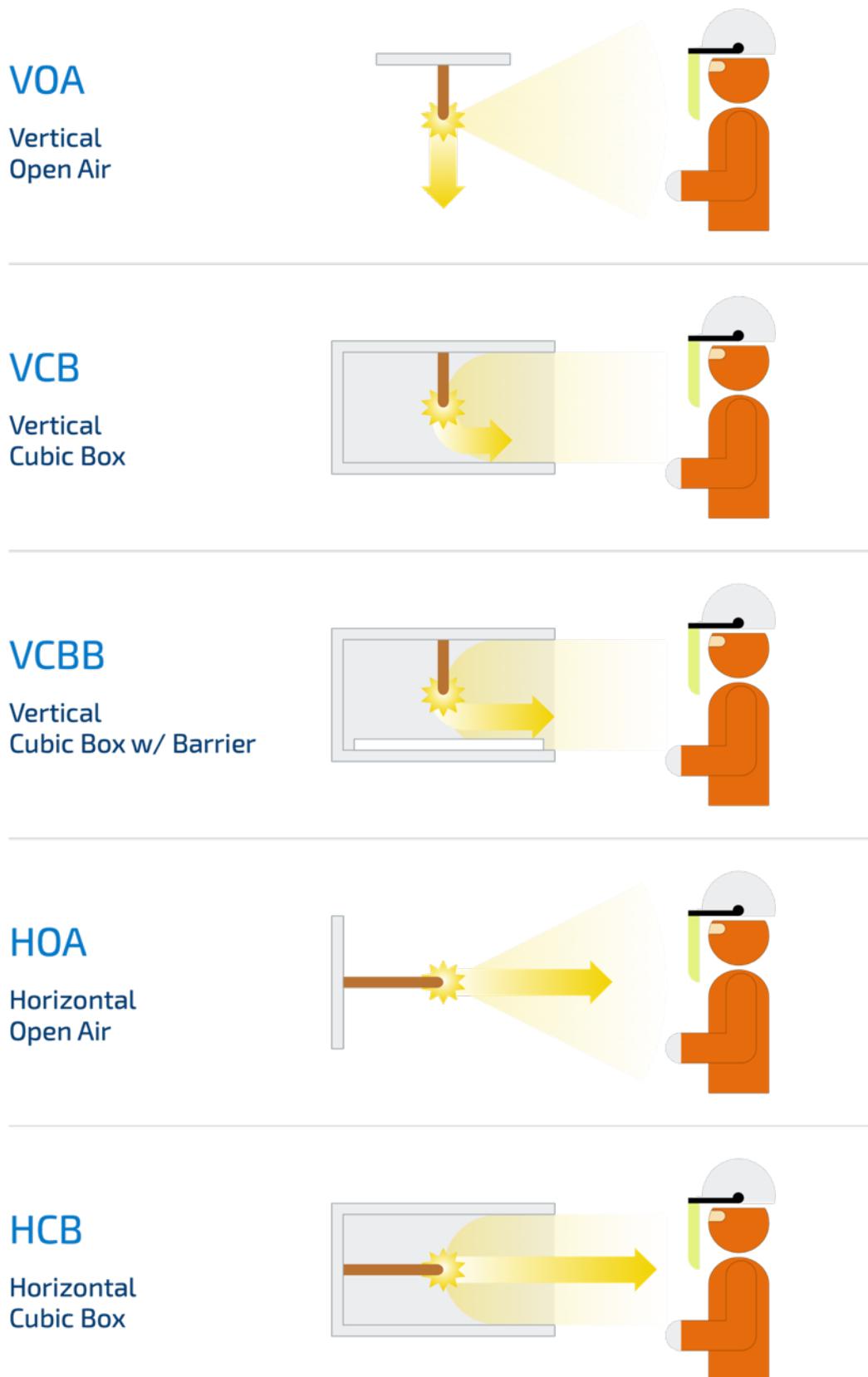


Figura 4.5 – Influência da disposição de eletrodo e do invólucro.

4.3.1.4 Espaçamento entre eletrodos (*G*)

O espaçamento entre eletrodos (*gap*), que num conjunto de manobra e comando pode ser considerado a distância entre terminais ou barramentos, é uma informação que geralmente não está prontamente disponível ao usuário, sendo necessário consultar os desenhos mecânicos, ou realizar inspeção interna no equipamento. Além da dificuldade ao acesso a esta informação, estabelecer o valor adequado pode não ser evidente, uma vez que o espaçamento costuma não ser constante ao longo do circuito.

Para os casos em que não seja possível identificar o espaçamento real, podem ser aplicados os valores típicos sugeridos para cada classe de equipamento, conforme indicado no Quadro 4.1. Estes valores foram os utilizados nos ensaios por se aproximarem dos encontrados em equipamentos reais.

Quadro 4.1 – Espaçamento entre eletrodos típico por classe de equipamento.

Classe de equipamento	Espaçamento entre eletrodos típico [mm]
CDC 15 kV	152
CCM 15 kV	152
CDC 5 kV	104
CCM 5 kV	104
CDC de baixa tensão	32
CCM de baixa tensão	25

Fonte: Adaptado de [1].

A influência do *gap* é complexa. Ele é considerado tanto no modelo matemático da corrente de arco (item 4.3.2.1) quanto no da energia incidente (item 4.3.3.1), mas com efeitos antagônicos. Quanto maior o *gap*, menor a corrente de arco (devido ao aumento de impedância), mas maior a energia incidente (devido ao aumento de tamanho do arco).

Outro efeito não computado no cálculo da severidade é que quanto maior o *gap*, maior a probabilidade do arco se auto extinguir.

4.3.1.5 Dimensões do invólucro (*Height* × *Width* × *Depth*)

As dimensões do invólucro (altura × largura × profundidade) possibilitam ao modelo ajustar os valores calculados de energia incidente para invólucros maiores ou menores do que os utilizados nos ensaios. Assim como no caso do *gap*, a determinação das dimensões reais do invólucro depende de inspeção em campo, ou de consulta aos desenhos do equipamento. O maior interesse está no tamanho da abertura (altura × largura) do invólucro. A profundidade só

é considerada no modelo até 600 V, e não entra diretamente no cálculo. Ela serve para classificar o invólucro como “típico” ou “raso”, influenciando no cálculo do fator de correção (item 4.3.2.4) indiretamente, através da aplicação de diferentes conjuntos de coeficientes.

Para os casos em que não seja possível identificar as dimensões reais, pode-se utilizar valores típicos, indicados no Quadro 4.2.

Quadro 4.2 – Dimensões de invólucro típicas por classe de equipamento.

Classe de equipamento	Dimensões do invólucro	
	Altura × Largura × Profundidade	
	[mm]	[in]
CDC 15 kV	1.143 × 762 × 762	45 × 30 × 30
CCM 15 kV	914,4 × 914,4 × 914,4	36 × 36 × 36
CDC 5 kV	914,4 × 914,4 × 914,4	36 × 36 × 36
	1143 × 762 × 762	45 × 30 × 30
CCM 5 kV	660,4 × 660,4 × 660,4	26 × 26 × 26
CDC de baixa tensão	508 × 508 × 508	20 × 20 × 20
CCM de baixa tensão	355,6 × 304,8 × ≤203,2 (raso)	14 × 12 × ≤8 (raso)
	355,6 × 304,8 × ≥203,2 (fundo)	14 × 12 × ≥8 (fundo)

Fonte: Adaptado de [1].

4.3.1.6 Distância de trabalho (*D*)

A distância de trabalho é “a distância entre a potencial fonte do arco elétrico e a face ou o peito do trabalhador que está executando a tarefa”.

O Quadro 4.3 apresenta as distâncias de trabalho típicas para as classes de equipamentos de maior interesse nos estudos de energia incidente. Estas distâncias são aplicadas na maioria dos estudos de energia incidente em sistemas industriais.

Quadro 4.3 – Distância de trabalho típica por classe de equipamento.

Classe de equipamento	Distância de trabalho	
	[mm]	[in]
CDC 15 kV	914,4	36
CCM 15 kV	914,4	36
CDC 5 kV	914,4	36
CCM 5 kV	914,4	36
CDC de baixa tensão	609,6	24
CCM de baixa tensão	457,2	18

Fonte: [1].

Distâncias de trabalho diferentes dos valores sugeridos no Quadro 4.3 podem (ou devem) ser consideradas para avaliações de energia incidente em atividades específicas, desde que tecnicamente justificadas.

4.3.2 Parâmetros intermediários – Calculados

4.3.2.1 Corrente de arco (I_{arc})

A corrente de arco, ou I_{arc} (*arcing fault current*), é definida como sendo “a corrente de falta que flui através do plasma do arco elétrico”. Ela depende principalmente da corrente de falta franca (I_{bf}), e de outros parâmetros em menor proporção, como o espaçamento entre eletrodos, a configuração de eletrodo e a tensão do sistema. Assim como a corrente de falta franca, a corrente de arco é o resultado do somatório de todas as contribuições naquele ponto, entretanto, a corrente de arco tem magnitude inferior devido à impedância do arco.

O modelo matemático da IEEE Std 1584-2018 estabelece um procedimento de cálculo em duas etapas, onde primeiramente é realizado o cálculo das correntes de arco eficazes médias referidas a três níveis de tensão padronizados (600, 2.700 e 14.300 V), e em seguida é determinado o valor final da corrente de arco para a tensão de circuito aberto do sistema, através da interpolação dos valores intermediários.

A Equação (4.1) é utilizada para a obtenção das correntes de arco eficazes médias.

$$I_{arc_Voc} = 10^{(k1+k2 \log_{10} I_{bf}+k3 \log_{10} G)} (k4I_{bf}^6 + k5I_{bf}^5 + k6I_{bf}^4 + k7I_{bf}^3 + k8I_{bf}^2 + k9I_{bf} + k10) \quad (4.1)$$

Onde:

- I_{arc_Voc} : é a corrente de arco eficaz média para V_{oc} (tensão padronizada) [kA];
- I_{bf} : é a corrente de falta franca trifásica simétrica eficaz [kA];
- G : é o espaçamento entre eletrodos [mm];
- $k1$ a $k10$: são os coeficientes fornecidos no Quadro 4.4.

Quadro 4.4 – Coeficientes para a Equação (4.1).

E.C.	V_{oc}	$k1$	$k2$	$k3$	$k4$	$k5$	$k6$	$k7$	$k8$	$k9$	$k10$
VCB	600 V	-4,29E-02	1,04E+00	-8,30E-02	0,00E+00	0,00E+00	-4,78E-09	1,96E-06	-2,29E-04	3,14E-03	1,09E+00
	2.700 V	6,50E-03	1,00E+00	-2,40E-02	-1,56E-12	4,56E-10	-4,19E-08	8,35E-07	5,48E-05	-3,19E-03	9,73E-01
	14.300 V	5,80E-03	1,02E+00	-1,10E-02	-1,56E-12	4,56E-10	-4,19E-08	8,35E-07	5,48E-05	-3,19E-03	9,73E-01
VCBB	600 V	-1,74E-02	9,80E-01	-5,00E-02	0,00E+00	0,00E+00	-5,77E-09	2,52E-06	-3,40E-04	1,19E-02	1,01E+00
	2.700 V	2,82E-03	9,95E-01	-1,25E-02	0,00E+00	-9,20E-11	2,90E-08	-3,26E-06	1,57E-04	-4,00E-03	9,83E-01
	14.300 V	1,48E-02	1,01E+00	-1,00E-02	0,00E+00	-9,20E-11	2,90E-08	-3,26E-06	1,57E-04	-4,00E-03	9,83E-01
HCB	600 V	5,49E-02	9,88E-01	-1,10E-01	0,00E+00	0,00E+00	-5,38E-09	2,32E-06	-3,02E-04	9,10E-03	9,73E-01
	2.700 V	1,01E-03	1,00E+00	-2,49E-02	0,00E+00	0,00E+00	4,86E-10	-1,81E-07	-9,13E-06	-7,00E-04	9,88E-01
	14.300 V	8,69E-03	9,99E-01	-2,00E-02	0,00E+00	-5,04E-11	2,23E-08	-3,05E-06	1,16E-04	-1,15E-03	9,84E-01
VOA	600 V	4,38E-02	1,04E+00	-1,80E-01	0,00E+00	0,00E+00	-4,78E-09	1,96E-06	-2,29E-04	3,14E-03	1,09E+00
	2.700 V	-2,40E-02	1,01E+00	-1,88E-02	-1,56E-12	4,56E-10	-4,19E-08	8,35E-07	5,48E-05	-3,19E-03	9,73E-01
	14.300 V	5,37E-03	1,01E+00	-2,90E-02	-1,56E-12	4,56E-10	-4,19E-08	8,35E-07	5,48E-05	-3,19E-03	9,73E-01
HOA	600 V	1,11E-01	1,01E+00	-2,40E-01	0,00E+00	0,00E+00	-3,90E-09	1,64E-06	-1,97E-04	2,62E-03	1,10E+00
	2.700 V	4,35E-04	1,01E+00	-3,80E-02	0,00E+00	0,00E+00	7,86E-10	-1,91E-07	-9,13E-06	-7,00E-04	9,98E-01
	14.300 V	9,04E-04	9,99E-01	-2,00E-02	0,00E+00	0,00E+00	7,86E-10	-1,91E-07	-9,13E-06	-7,00E-04	9,98E-01

Fonte: Adaptado da Tabela 1 de [1].

Para se calcular o valor final da corrente de arco, devem ser utilizadas as equações de acordo com a tensão de circuito aberto do sistema. Para os sistemas acima de 600 V, devem ser utilizadas as equações (4.2), (4.3) e (4.4).

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

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

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

Onde:

- I_{arc_1} : termo da interpolação de I_{arc} , entre 600 e 2.700 V [kA];
- I_{arc_2} : termo da interpolação de I_{arc} , usado quando V_{oc} é maior que 2.700 V [kA];
- I_{arc_3} : termo da interpolação de I_{arc} , usado quando V_{oc} é menor que 2.700 V [kA];
- V_{oc} : é a tensão de circuito aberto do sistema [kV].

Quando $0,6 < V_{\text{oc}} \leq 2,7$ o valor final de I_{arc} será I_{arc_3} . Quando $V_{\text{oc}} \geq 2,7$ o valor final de I_{arc} será I_{arc_2} .

Para os sistemas até 600 V, deve ser utilizada a equação (4.5).

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

Onde:

- I_{arc} : é a corrente de arco eficaz média para V_{oc} [kA];
- I_{arc_600} : é a corrente de arco eficaz média para 600 V [kA];
- I_{bf} : é a corrente de falta franca trifásica simétrica eficaz [kA];
- V_{oc} : é a tensão de circuito aberto do sistema [kV].

4.3.2.2 Fator de correção de variação de corrente de arco ($VarC_f$)

A corrente de arco é um fenômeno difícil de ser modelado. Os ensaios realizados demonstraram que a corrente de arco apresenta um comportamento dinâmico e instável em sistemas com tensão nominal abaixo de 600 V, podendo atingir valores até 15% menores do que a corrente de arco plena em sistemas de 480 V. Também foi observado que a instabilidade da corrente de arco diminui com o aumento da tensão, sendo considerada relativamente estável em sistemas de média tensão, onde foram observadas variações com relação à máxima corrente de arco de 4% para sistemas de 4,16 kV e de 2% para sistemas de 13,8 kV.

Estas variações de corrente de arco podem afetar o tempo de atuação dos dispositivos de proteção. Deste modo, a norma determina que, além da máxima corrente de arco (I_{arc}), deve ser calculado um segundo valor de corrente de arco, chamado de corrente de arco mínima (I_{arc_min}), para o qual deve ser repetido o processo de cálculo de energia incidente.

O fator de correção de variação de corrente de arco é calculado pela Equação (4.6).

$$VarC_f = k1V_{oc}^6 + k2V_{oc}^5 + k3V_{oc}^4 + k4V_{oc}^3 + k5V_{oc}^2 + k6V_{oc} + k7 \quad (4.6)$$

Onde:

- $VarC_f$: é o fator de variação de corrente;
- V_{oc} : é a tensão de circuito aberto do sistema [kV];
- $k1$ a $k7$: são os coeficientes fornecidos no Quadro 4.5.

Quadro 4.5 – Coeficientes para a Equação (4.6).

E.C.	k1	k2	k3	k4	k5	k6	k7
VCB	0,00E+00	-1,43E-06	8,31E-05	-1,94E-03	2,24E-02	-1,26E-01	3,02E-01
VCBB	1,14E-06	-6,03E-05	1,28E-03	-1,38E-02	8,02E-02	-2,41E-01	3,35E-01
HCB	0,00E+00	-3,10E-06	1,64E-04	-3,36E-03	3,33E-02	-1,62E-01	3,46E-01
VOA	9,56E-07	-5,15E-05	1,12E-03	-1,24E-02	7,51E-02	-2,36E-01	3,37E-01
HOA	0,00E+00	-3,16E-06	1,68E-04	-3,46E-03	3,41E-02	-1,60E-01	3,46E-01

Fonte: Adaptado da Tabela 2 de [1].

Por sua vez, a mínima corrente de arco é calculada pela Equação (4.7).

$$I_{arc_min} = I_{arc} \times (1 - 0,5 \times VarC_f) \quad (4.7)$$

Onde:

- I_{arc_min} : é a corrente de arco mínima obtida com $VarC_f$ [kA];
- I_{arc} : é a corrente de arco máxima [kA].

4.3.2.3 Duração de arco (T_{arc})

A duração de arco (T_{arc}) é definida genericamente como “o tempo que a fonte a montante da corrente de arco leva para interromper a corrente ou energia para o arco elétrico”.

Tipicamente, a duração de arco é determinada pelo tempo total de atuação do sistema de proteção. Este tempo total compreende o tempo de detecção, de processamento, de atraso intencional e de atuação do dispositivo de proteção, somado com o tempo de operação do dispositivo de interrupção ou extinção.

Na maioria dos casos, a proteção industrial é realizada através de elementos de sobrecorrente, tanto instantâneos quanto temporizados. Portanto, em função da possibilidade de sensibilização de elementos do tipo tempo inverso, a duração de arco pode depender da magnitude da corrente de arco que passa pelos elementos sensores (TCs).

A determinação da duração de arco também deve levar em consideração:

- A existência de outros tipos de elementos ou dispositivos de proteção com tempo de operação definido, como elementos de proteção diferencial ou relés de detecção de arco por sensor de luz ou pressão;
- A existência de múltiplas fontes, onde deve ser avaliado por quanto tempo cada fonte contribuirá para sustentar o arco. Neste caso, a norma presume que a distribuição da corrente de arco total entre as múltiplas fontes será proporcional à distribuição da corrente de falta franca entre estas fontes;
- Qualquer fonte potencial de atraso na eliminação da falta, como a existência de esquemas especiais de proteção, seletividade lógica, relés em cascata, redes de comunicação etc.

Em algumas circunstâncias especiais, a duração de arco não depende diretamente de dispositivos de proteção, mas sim do tempo necessário para dissipar através do arco a energia armazenada, como é o caso da ocorrência de arco elétrico nos terminais de um gerador ou de uma bateria.

A energia incidente depende linearmente da duração de arco. Durações de arco muito elevadas, na casa de segundos, podem levar o nível estimado de energia incidente a valores intoleráveis. Caso o tempo de eliminação da falta pelos dispositivos de proteção exceda a 2 s, a norma sugere uma avaliação criteriosa da aplicação. Em algumas situações, pode ser razoável considerar que em 2 s um trabalhador exposto consiga se afastar, podendo ser considerado um limite de duração máxima. Por outro lado, este critério não pode ser aplicado em situações em que, por algum motivo, a capacidade do trabalhador exposto se afastar rapidamente seja reduzida, como é o caso de um serviço em ambiente confinado.

4.3.2.4 Correção do tamanho do invólucro (CF)

As equações para o cálculo da energia incidente e do limite de aproximação segura, nas configurações VCB, VCBB e HCB, são normalizadas para um invólucro com dimensões de 508 mm × 508 mm × 508 mm (20 in × 20 in × 20 in).

Para se obter o resultado correto para um invólucro de dimensões diferentes, a norma determina que o valor da energia incidente seja ajustado para invólucros maiores ou menores que o normalizado, através de um fator de correção (CF), que deve ser calculado conforme procedimento específico. Nas configurações VOA e HOA, por não haver invólucro, o fator de correção é unitário.

Um invólucro é considerado “Raso” se atender simultaneamente as seguintes condições:

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

Para os invólucros classificados como “Rasos”, fator de correção é determinado conforme Equação (4.8).

$$CF = \frac{1}{b1 \times EES^2 + b2 \times EES + b3} \quad (4.8)$$

Para os demais invólucros, classificados como “Típicos”, fator de correção é determinado conforme Equação (4.9).

$$CF = b1 \times EES^2 + b2 \times EES + b3 \quad (4.9)$$

Onde:

- **CF** : é o fator de correção do tamanho do invólucro;
- **EES** : é o tamanho de invólucro equivalente (item 4.8.3 da IEEE Std 1584-2018);
- **$b1$ a $b3$** : são os coeficientes fornecidos no Quadro 4.6.

Quadro 4.6 – Coeficientes para as Equações (4.8) e (4.9).

<i>Tipo de invólucro</i>	<i>E.C.</i>	<i>b1</i>	<i>b2</i>	<i>b3</i>
Típico	VCB	-3,02E-04	3,44E-02	4,33E-01
	VCBB	-2,98E-04	3,20E-02	4,79E-01
	HCB	-1,92E-04	1,94E-02	6,90E-01
Raso	VCB	2,22E-03	-2,56E-02	6,22E-01
	VCBB	-2,78E-03	1,19E-01	-2,78E-01
	HCB	-5,56E-04	3,72E-02	4,78E-01

Fonte: Adaptado da Tabela 7 de [1].

4.3.3 Dados de saída – Resultados

4.3.3.1 Energia incidente (E)

A energia incidente é definida como sendo “a quantidade de energia térmica impressa em uma superfície, a uma certa distância da fonte, gerada durante um evento de arco elétrico”. Pelo SI⁴⁸, a energia incidente é expressa em J/cm². Entretanto, é usual na indústria a utilização de cal/cm² (unidade antiga, não pertencente ao SI)⁴⁹.

A energia incidente aumenta à medida que a distância da fonte do arco diminui, e vice-versa. Um determinado valor de energia incidente somente é válido para uma certa distância da fonte do arco. Tecnicamente, pode-se calcular a energia incidente para qualquer distância, no entanto, o valor calculado só tem sentido se a distância utilizada no estudo tiver relação com alguma situação de interesse.

Para evitar que sejam utilizadas distâncias aleatórias, e ao mesmo tempo auxiliar a gestão do risco, a energia incidente deve ser calculada para uma distância específica, chamada de “distância de trabalho”.

Assim como no cálculo da corrente de arco, o cálculo da energia incidente é realizado em duas etapas. Inicialmente são calculados os valores de energia incidente para três níveis de tensão padronizados (600, 2.700 e 14.300 V), através das Equações (4.10), (4.11), (4.12) e (4.13), e em seguida é determinado o valor final da energia incidente para a tensão de circuito aberto do sistema, através da interpolação dos valores intermediários.

$$E_{600} = \frac{12,552}{50} T \times 10^{\left(k1+k2 \log_{10} G + \frac{k3 I_{arc\ 600}}{k4 I_{bf}^7 + k5 I_{bf}^6 + k6 I_{bf}^5 + k7 I_{bf}^4 + k8 I_{bf}^3 + k9 I_{bf}^2 + k10 I_{bf}} + k11 \log_{10} I_{bf} + k12 \log_{10} D + k13 \log_{10} I_{arc\ 600} + \log_{10} \frac{1}{CF} \right)} \quad (4.10)$$

$$E_{2700} = \frac{12,552}{50} T \times 10^{\left(k1+k2 \log_{10} G + \frac{k3 I_{arc\ 2700}}{k4 I_{bf}^7 + k5 I_{bf}^6 + k6 I_{bf}^5 + k7 I_{bf}^4 + k8 I_{bf}^3 + k9 I_{bf}^2 + k10 I_{bf}} + k11 \log_{10} I_{bf} + k12 \log_{10} D + k13 \log_{10} I_{arc\ 2700} + \log_{10} \frac{1}{CF} \right)} \quad (4.11)$$

$$E_{14300} = \frac{12,552}{50} T \times 10^{\left(k1+k2 \log_{10} G + \frac{k3 I_{arc\ 14300}}{k4 I_{bf}^7 + k5 I_{bf}^6 + k6 I_{bf}^5 + k7 I_{bf}^4 + k8 I_{bf}^3 + k9 I_{bf}^2 + k10 I_{bf}} + k11 \log_{10} I_{bf} + k12 \log_{10} D + k13 \log_{10} I_{arc\ 14300} + \log_{10} \frac{1}{CF} \right)} \quad (4.12)$$

$$E_{\leq 600} = \frac{12,552}{50} T \times 10^{\left(k1+k2 \log_{10} G + \frac{k3 I_{arc\ 600}}{k4 I_{bf}^7 + k5 I_{bf}^6 + k6 I_{bf}^5 + k7 I_{bf}^4 + k8 I_{bf}^3 + k9 I_{bf}^2 + k10 I_{bf}} + k11 \log_{10} I_{bf} + k12 \log_{10} D + k13 \log_{10} I_{arc} + \log_{10} \frac{1}{CF} \right)} \quad (4.13)$$

⁴⁸ SI: Sistema Internacional de Unidades.

⁴⁹ 1 cal/cm² corresponde a 4,184 J/cm².

Onde:

- E_{600} : é a energia incidente para $V_{oc} = 600$ V [J/cm²];
- E_{2700} : é a energia incidente para $V_{oc} = 2.700$ V [J/cm²];
- E_{14300} : é a energia incidente para $V_{oc} = 14.300$ V [J/cm²];
- $E_{\leq 600}$: é a energia incidente para $V_{oc} \leq 600$ V [J/cm²];
- T : é a duração de arco [ms];
- G : é o espaçamento entre eletrodos [mm];
- I_{arc_600} : é a corrente de arco eficaz para $V_{oc} = 600$ V [kA];
- I_{arc_2700} : é a corrente de arco eficaz para $V_{oc} = 2.700$ V [kA];
- I_{arc_14300} : é a corrente de arco eficaz para $V_{oc} = 14.300$ V [kA];
- I_{arc} : é a corrente de arco eficaz para $V_{oc} \leq 600$ V [kA];
- I_{bf} : é a corrente de falta franca trifásica simétrica eficaz [kA];
- D : é a distância de trabalho [mm];
- CF : é o fator de correção de tamanho do invólucro;
- $k1$ a $k13$: são os coeficientes fornecidos no Quadro 4.7, Quadro 4.8 e Quadro 4.9.

Quadro 4.7 – Coeficientes para as Equações (4.10), (4.13), (4.17) e (4.20).

600 V	k1	k2	k3	k4	k5	k6	k7	k8	k9	k10	k11	k12	k13
VCB	7,53E-01	5,66E-01	1,75E+00	0,00E+00	0,00E+00	-4,78E-09	1,96E-06	-2,29E-04	3,14E-03	1,09E+00	0,00E+00	-1,60E+00	9,57E-01
VCBB	3,07E+00	2,60E-01	-9,81E-02	0,00E+00	0,00E+00	-5,77E-09	2,52E-06	-3,40E-04	1,19E-02	1,01E+00	-6,00E-02	-1,81E+00	1,19E+00
HCB	4,07E+00	3,44E-01	-3,70E-01	0,00E+00	0,00E+00	-5,38E-09	2,32E-06	-3,02E-04	9,10E-03	9,73E-01	0,00E+00	-2,03E+00	1,04E+00
VOA	6,79E-01	7,46E-01	1,22E+00	0,00E+00	0,00E+00	-4,78E-09	1,96E-06	-2,29E-04	3,14E-03	1,09E+00	0,00E+00	-1,60E+00	9,97E-01
HOA	3,47E+00	4,65E-01	-2,62E-01	0,00E+00	0,00E+00	-3,90E-09	1,64E-06	-1,97E-04	2,62E-03	1,10E+00	0,00E+00	-1,99E+00	1,04E+00

Fonte: Adaptado da Tabela 3 de [1].

Quadro 4.8 – Coeficientes para as Equações (4.11) e (4.18).

2700 V	k1	k2	k3	k4	k5	k6	k7	k8	k9	k10	k11	k12	k13
VCB	2,40E+00	1,65E-01	3,54E-01	-1,56E-12	4,56E-10	-4,19E-08	8,35E-07	5,48E-05	-3,19E-03	9,73E-01	0,00E+00	-1,57E+00	9,78E-01
VCBB	3,87E+00	1,85E-01	-7,37E-01	0,00E+00	-9,20E-11	2,90E-08	-3,26E-06	1,57E-04	-4,00E-03	9,83E-01	0,00E+00	-1,74E+00	1,09E+00
HCB	3,49E+00	1,77E-01	-1,93E-01	0,00E+00	0,00E+00	4,86E-10	-1,81E-07	-9,13E-06	-7,00E-04	9,88E-01	2,70E-02	-1,72E+00	1,06E+00
VOA	3,88E+00	1,05E-01	-1,91E+00	-1,56E-12	4,56E-10	-4,19E-08	8,35E-07	5,48E-05	-3,19E-03	9,73E-01	0,00E+00	-1,52E+00	1,12E+00
HOA	3,62E+00	1,49E-01	-7,62E-01	0,00E+00	0,00E+00	7,86E-10	-1,91E-07	-9,13E-06	-7,00E-04	9,98E-01	0,00E+00	-1,64E+00	1,08E+00

Fonte: Adaptado da Tabela 4 de [1].

Quadro 4.9 – Coeficientes para as Equações (4.12) e (4.19).

14300 V	k1	k2	k3	k4	k5	k6	k7	k8	k9	k10	k11	k12	k13
VCB	3,83E+00	1,10E-01	-1,00E+00	-1,56E-12	4,56E-10	-4,19E-08	8,35E-07	5,48E-05	-3,19E-03	9,73E-01	0,00E+00	-1,57E+00	9,90E-01
VCBB	3,64E+00	2,15E-01	-5,86E-01	0,00E+00	-9,20E-11	2,90E-08	-3,26E-06	1,57E-04	-4,00E-03	9,83E-01	0,00E+00	-1,68E+00	1,06E+00
HCB	3,04E+00	1,25E-01	2,45E-01	0,00E+00	-5,04E-11	2,23E-08	-3,05E-06	1,16E-04	-1,15E-03	9,84E-01	0,00E+00	-1,66E+00	1,08E+00
VOA	3,41E+00	1,20E-01	-9,32E-01	-1,56E-12	4,56E-10	-4,19E-08	8,35E-07	5,48E-05	-3,19E-03	9,73E-01	0,00E+00	-1,53E+00	9,79E-01
HOA	2,04E+00	1,77E-01	1,01E+00	0,00E+00	0,00E+00	7,86E-10	-1,91E-07	-9,13E-06	-7,00E-04	9,98E-01	-5,00E-02	-1,63E+00	1,15E+00

Fonte: Adaptado da Tabela 5 de [1].

Para se calcular o valor final da energia incidente, devem ser utilizadas as equações de acordo com a tensão de circuito aberto do sistema. Para os sistemas acima de 600 V, devem ser utilizadas as Equações (4.14), (4.15) e (4.16).

$$E_1 = \frac{E_{2700} - E_{600}}{2,1} (V_{oc} - 2,7) + E_{2700} \quad (4.14)$$

$$E_2 = \frac{E_{14300} - E_{2700}}{11,6} (V_{oc} - 14,3) + E_{14300} \quad (4.15)$$

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

Onde:

- E_1 : é o primeiro termo da interpolação de E , entre 600 e 2.700 V [J/cm²];
- E_2 : é o segundo termo da interpolação de E , quando V_{oc} é maior que 2.700 V [J/cm²];
- E_3 : é o terceiro termo da interpolação de E , quando V_{oc} é menor que 2.700 V [J/cm²];
- V_{oc} : é a tensão de circuito aberto do sistema [kV];

Quando $0,6 < V_{oc} \leq 2,7$ o valor final de E será E_3 . Quando $V_{oc} \geq 2,7$ o valor final de E será E_2 .

Para os sistemas até 600 V, E será igual a $E_{\leq 600}$.

4.3.3.2 Limite de aproximação segura (AFB)

O limite de aproximação segura é o termo usual no Brasil para o que as normas norte-americanas chamam de *arc-flash boundary (AFB)*, que é “a distância da potencial fonte do arco elétrico na qual a energia incidente é calculada em 1,2 cal/cm²”. A intensidade de 1,2 cal/cm² é definida como o limiar de energia incidente que pode provocar uma queimadura de segundo grau em uma pele desprotegida [15]. A origem desta definição remonta às décadas de 50 e 60, fruto do trabalho liderado pela física Alice Mary Stoll, pesquisadora da Marinha dos Estados Unidos, com o objetivo de avaliar os efeitos da energia térmica na pele humana, e o desempenho de tecidos destinados à proteção de pilotos de avião.

Um exemplo que permite uma noção desta magnitude é: “se um isqueiro de butano for mantido a 1 cm do dedo de uma pessoa por 1 s, e o dedo estiver na chama azul, a área de 1 cm² do dedo será exposta a cerca de 1,2 cal/cm²” [1].

Em outros termos, o limite de aproximação segura não garante a incolumidade absoluta, é admitido que ocorra um dano limitado.

O cálculo do limite de aproximação segura segue processo de duas etapas. Inicialmente são calculados os valores para três níveis de tensão padronizados (600, 2.700 e 14.300 V), através das Equações (4.17), (4.18), (4.19) e (4.20), e em seguida é determinado o valor final para a tensão de circuito aberto do sistema, através da interpolação dos valores intermediários.

$$AFB_{600} = 10^{\left(\frac{k1+k2 \log_{10} G + \frac{k3I_{arc_600}}{k4I_{bf}^7+k5I_{bf}^6+k6I_{bf}^5+k7I_{bf}^4+k8I_{bf}^3+k9I_{bf}^2+k10I_{bf}} + k11 \log_{10} I_{bf} + k13 \log_{10} I_{arc_600} + \log_{10} \frac{1}{CF} - \log_{10} \frac{20}{T}}{-k12} \right)} \quad (4.17)$$

$$AFB_{2700} = 10^{\left(\frac{k1+k2 \log_{10} G + \frac{k3I_{arc_2700}}{k4I_{bf}^7+k5I_{bf}^6+k6I_{bf}^5+k7I_{bf}^4+k8I_{bf}^3+k9I_{bf}^2+k10I_{bf}} + k11 \log_{10} I_{bf} + k13 \log_{10} I_{arc_2700} + \log_{10} \frac{1}{CF} - \log_{10} \frac{20}{T}}{-k12} \right)} \quad (4.18)$$

$$AFB_{14300} = 10^{\left(\frac{k1+k2 \log_{10} G + \frac{k3I_{arc_14300}}{k4I_{bf}^7+k5I_{bf}^6+k6I_{bf}^5+k7I_{bf}^4+k8I_{bf}^3+k9I_{bf}^2+k10I_{bf}} + k11 \log_{10} I_{bf} + k13 \log_{10} I_{arc_14300} + \log_{10} \frac{1}{CF} - \log_{10} \frac{20}{T}}{-k12} \right)} \quad (4.19)$$

$$AFB_{\leq 600} = 10^{\left(\frac{k1+k2 \log_{10} G + \frac{k3I_{arc_600}}{k4I_{bf}^7+k5I_{bf}^6+k6I_{bf}^5+k7I_{bf}^4+k8I_{bf}^3+k9I_{bf}^2+k10I_{bf}} + k11 \log_{10} I_{bf} + k13 \log_{10} I_{arc} + \log_{10} \frac{1}{CF} - \log_{10} \frac{20}{T}}{-k12} \right)} \quad (4.20)$$

Onde:

- **AFB_{600}** : é o limite de aproximação segura para $V_{oc} = 600$ V [mm];
- **AFB_{2700}** : é o limite de aproximação segura para $V_{oc} = 2.700$ V [mm];
- **AFB_{14300}** : é o limite de aproximação segura para $V_{oc} = 14.300$ V [mm];
- **$AFB_{\leq 600}$** : é o limite de aproximação segura para $V_{oc} \leq 600$ V [mm];
- **G** : é o espaçamento entre eletrodos [mm];
- **I_{arc_600}** : é a corrente de arco eficaz para $V_{oc} = 600$ V [kA];
- **I_{arc_2700}** : é a corrente de arco eficaz para $V_{oc} = 2.700$ V [kA];
- **I_{arc_14300}** : é a corrente de arco eficaz para $V_{oc} = 14.300$ V [kA];
- **I_{arc}** : é a corrente de arco eficaz para $V_{oc} \leq 600$ V [kA];
- **I_{bf}** : é a corrente de falta franca trifásica simétrica eficaz [kA];
- **CF** : é o fator de correção de tamanho do invólucro;
- **T** : é a duração de arco [ms];
- **$k1$ a $k13$** : são os coeficientes fornecidos no Quadro 4.7, Quadro 4.8 e Quadro 4.9.

Para se calcular o valor final do limite de aproximação segura, devem ser utilizadas as equações de acordo com a tensão de circuito aberto do sistema. Para os sistemas acima de 600 V, devem ser utilizadas as Equações (4.21), (4.22) e (4.23).

$$AFB_1 = \frac{AFB_{2700} - AFB_{600}}{2,1} (V_{oc} - 2,7) + AFB_{2700} \quad (4.21)$$

$$AFB_2 = \frac{AFB_{14300} - AFB_{2700}}{11,6} (V_{oc} - 14,3) + AFB_{14300} \quad (4.22)$$

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

Onde:

- **AFB_1** : termo da interpolação de AFB , entre 600 e 2.700 V [mm];
- **AFB_2** : termo da interpolação de AFB , quando V_{oc} é maior que 2.700 V [mm];
- **AFB_3** : termo da interpolação de E , quando V_{oc} é menor que 2.700 V [mm];
- **V_{oc}** : é a tensão de circuito aberto do sistema [kV];

Quando $0,6 < V_{oc} \leq 2,7$ o valor final de AFB será AFB_3 . Quando $V_{oc} \geq 2,7$ o valor final de AFB será AFB_2 .

Para os sistemas até 600 V, AFB será igual a $AFB_{\leq 600}$.

4.4 Considerações finais

Este capítulo apresentou uma visão geral do método IEEE Std 1584-2018, e discutiu os principais parâmetros envolvidos.

Como foi mostrado, cada parâmetro possui particularidades, e o conhecimento das circunstâncias e dos motivos pelos quais eles foram incorporados ao método contribui para um adequado levantamento de dados e para uma correta interpretação dos resultados do estudo.

O principal resultado do estudo, que é a energia incidente, é um valor extraído da curva de ajuste de energia incidente levantada nos ensaios da IEEE Std 1584-2018, nas condições discutidas neste capítulo, sendo válido para a distância de trabalho e a duração de arco precisamente definidos.

O capítulo também deixa evidente a necessidade de uma ferramenta computacional para execução do estudo, que será proposta no próximo capítulo.

5 DESENVOLVIMENTO DE SCRIPT DE CÁLCULO

5.1 Considerações iniciais

Este capítulo descreve o desenvolvimento de um script de cálculo de energia incidente, baseado no método IEEE Std 1584-2018, escrito na plataforma MATLAB, originalmente na versão R2020a. Cabe mencionar que o script foi intencionalmente escrito com mensagens e comentários em inglês, visando favorecer sua eventual utilização em trabalhos destinados a eventos técnicos de abrangência internacional.

5.2 Visão geral do script

A Figura 5.1 apresenta o diagrama de blocos do script desenvolvido, indicando os arquivos de entrada e saída de dados, e as principais funções.

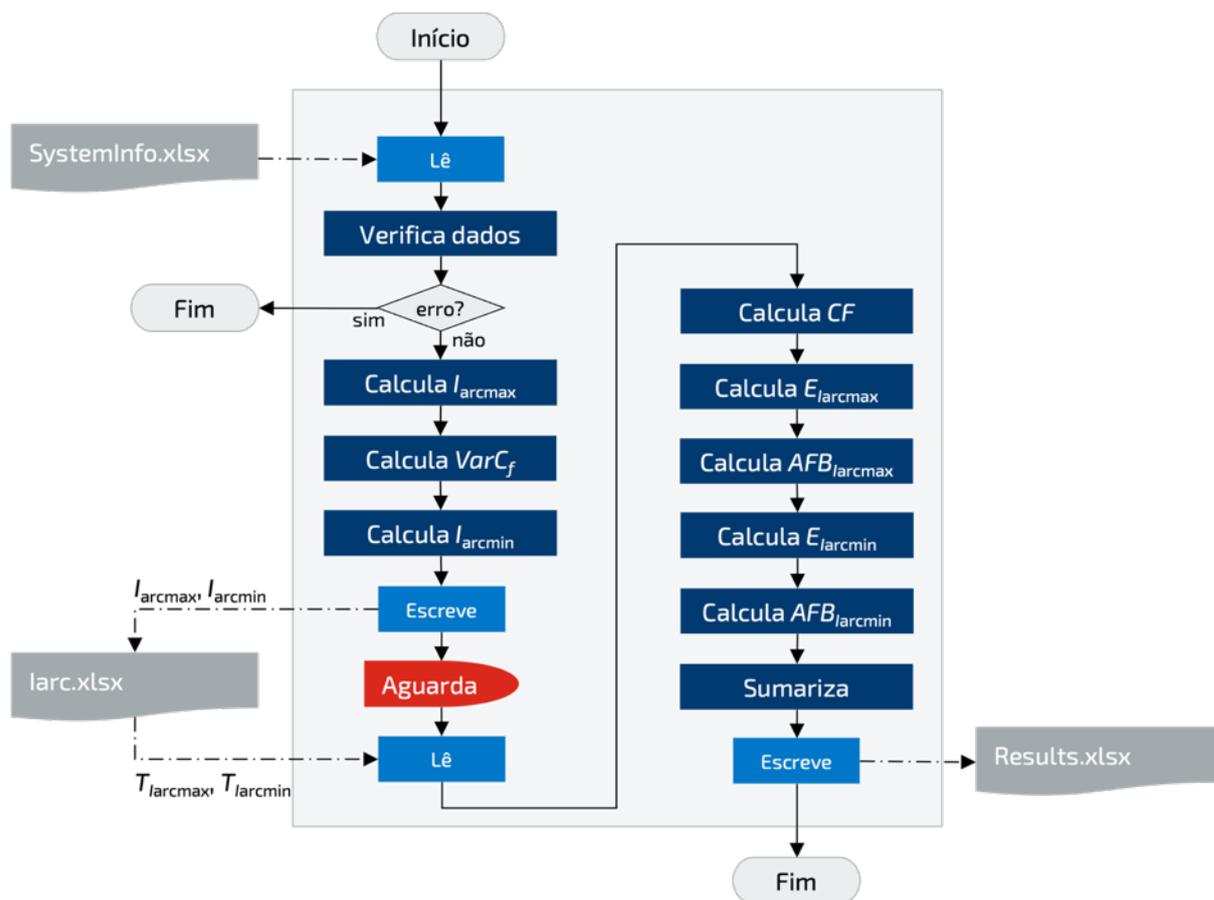


Figura 5.1 – Script: Diagrama de blocos.

O script desenvolvido, chamado de “IEEE1584_2018”, utiliza planilhas em formato Microsoft Excel como meio de entrada e saída de dados, pois este aplicativo proporciona praticidade na manipulação de dados. Há uma etapa intermediária, após o cálculo das correntes de arco, em que o usuário deve informar as respectivas durações de arco, após consultar o Estudo de Seletividade da Proteção, para que os valores de energia incidente e do limite de aproximação segura possam ser calculados. A execução é rápida. Utilizando-se um computador pessoal padrão (processador Intel Core i5), um caso completo é executado em 175 ms em média, enquanto uma planilha com 10 mil casos leva aproximadamente 8 s para ser calculada.

O Quadro 5.1 apresenta a relação dos arquivos envolvidos na execução do script.

Quadro 5.1 – Relação de arquivos.

Tipo de arquivo	Nome do arquivo	Descrição
MATLAB	IEEE1584_2018.m	Script principal
	checkdata.m	Função para checar validade dos dados de entrada
	currentvarcf.m	Função para cálculo do $VarC_f$
	enclosurecf.m	Função para cálculo do CF
	finalvalues.m	Função para cálculo dos valores finais (interpolação)
	interboundary.m	Função para cálculo valores intermediários de AFB
	intercurrent.m	Função para cálculo valores intermediários de I_{arc}
	interenergy.m	Função para cálculo valores intermediários de E
Microsoft Excel	SystemInfo.xlsx	Planilha com dados de entrada
	Iarc.xlsx	Planilha com correntes e durações de arco
	Results.xlsx	Planilha com resultados

O código-fonte completo se encontra no ANEXO B.

5.3 Principais funções

5.3.1 Função *checkdata*

A função *checkdata* é a primeira das funções a ser executada. Tem como argumento de entrada os dados informados pelo usuário, e realiza duas verificações:

- i. **Qualidade dos dados:** Verifica se a configuração de eletrodo informada está de acordo com as cinco opções possíveis, e se os demais dados são numéricos;
- ii. **Faixa de aplicação:** Verifica se os dados numéricos estão dentro da faixa de aplicação do modelo.

O resultado da verificação é apresentado na janela de comando do MATLAB.

Caso seja identificado algum problema de qualidade ou algum parâmetro fora da faixa de aplicação, o parâmetro inválido é indicado e a execução do script é interrompida.

Como exemplo, foram criados seis painéis fictícios, identificados como PN-01, PN-02, PN-03, PN-04, PN-05 e PN-06, cujos parâmetros foram livremente arbitrados apenas com o intuito de testar e validar o script. A Figura 5.2 ilustra como se comporta a função *checkdata* quando encontra dados inválidos (destacados em vermelho).

```
>> IEEE1584_2018

***** Arc-Flash Hazard Calculations *****
Method: IEEE Std 1584™-2018
Author: Edson Fernando Machado Sato
Script: Version 1.1
```

Name	Config	Voc_kV	Ibf_kA	Gap_mm	WkD_mm	H_mm	W_mm	D_mm	Result
{'PN-01'}	{'VCBB'}	13.8	15	152	914.4	1000	800	900	{'OK' }
{'PN-02'}	{'VCVV'}	13.8	20	152	914.4	1000	800	900	{'BAD QUALITY: Config' }
{'PN-03'}	{'VCBB'}	4.16	NaN	104	914.4	750	500	500	{'BAD QUALITY: Ibf' }
{'PN-04'}	{'VCBB'}	4.16	100	104	914.4	750	500	500	{'OUT OF RANGE: Ibf' }
{'PN-05'}	{'VCBB'}	0.48	30	32	200	750	500	500	{'OUT OF RANGE: WorkD' }
{'PN-06'}	{'VVBB'}	0.48	200	32	609.6	750	500	500	{'BAD QUALITY: Config' }

```
*** Some parameters are in bad quality or out of range. Script execution aborted! ***

>>
```

Figura 5.2 – Script: Função *checkdata* com dados inválidos.

Erros de qualidade de dados são indicados com a expressão “BAD QUALITY”. Dados fora da faixa de aplicação do modelo são indicados com a expressão “OUT OF RANGE”. Quando é encontrado um erro de qualidade de dados, não é feita a verificação de faixa de aplicação para o equipamento em questão.

Se forem encontrados erros, o usuário deve corrigi-los na planilha que contém os dados de entrada e reiniciar o script. Se todos os dados forem válidos, a função *checkdata* indicará “OK” na última coluna de cada linha, conforme Figura 5.3, e o script prosseguirá a sua execução normalmente.

```
>> IEEE1584_2018

***** Arc-Flash Hazard Calculations *****
Method: IEEE Std 1584™-2018
Author: Edson Fernando Machado Sato
Script: Version 1.1
```

Name	Config	Voc_kV	Ibf_kA	Gap_mm	WkD_mm	H_mm	W_mm	D_mm	Result
{'PN-01'}	{'VCBB'}	13.8	15	152	914.4	1000	800	900	{'OK'}
{'PN-02'}	{'VCBB'}	13.8	20	152	914.4	1000	800	900	{'OK'}
{'PN-03'}	{'VCBB'}	4.16	7.5	104	914.4	750	500	500	{'OK'}
{'PN-04'}	{'VCBB'}	4.16	10	104	914.4	750	500	500	{'OK'}
{'PN-05'}	{'VCBB'}	0.48	30	32	609.6	750	500	500	{'OK'}
{'PN-06'}	{'VCBB'}	0.48	50	32	609.6	750	500	500	{'OK'}

```
*** All parameters are valid! ***
```

Figura 5.3 – Script: Função *checkdata* com dados válidos.

5.3.2 Função *intercurrent*, *interenergy* e *interboundary*

As funções *intercurrent*, *interenergy* e *interboundary* são o coração do modelo matemático, sendo responsáveis por calcular, respectivamente, os valores intermediários de corrente de arco, de energia incidente e de limite de aproximação segura para os valores padronizados de tensão (600, 2.700 e 14.300 V).

- ***intercurrent***: executa a equação (4.1);
- ***interenergy***: executa as equações (4.10), (4.11), (4.12) e (4.13);
- ***interboundary***: executa as equações (4.17), (4.18), (4.19) e (4.20).

5.3.3 Função *finalvalues*

A função *finalvalues* interpola os valores calculados para as tensões padronizadas através das funções *intercurrent*, *interenergy* e *interboundary*, obtendo os valores finais destas grandezas para a tensão de circuito aberto do sistema. Através desta função são executadas as equações (4.2), (4.3) e (4.4), aplicáveis aos sistemas com tensão nominal acima de 600 V. Para os sistemas com tensão nominal até 600 V, a função *finalvalues* não é utilizada, sendo a equação (4.5) processada diretamente no corpo do script principal.

5.3.4 Função *enclosurecf*

A função *enclosurecf* calcula o fator de correção do tamanho do invólucro (CF), que é aplicável às configurações de eletrodo VCB, VCBB e HCB. Através desta função são calculadas as equações (4.8) e (4.9).

5.3.5 Função *currentvarcf*

A função *currentvarcf* calcula o fator de correção de variação de corrente ($VarC_f$), que é utilizado para estimar a corrente de arco reduzida. Através desta função é executada a equação (4.6). No modelo matemático, o $VarC_f$ não é aplicado diretamente ao valor de corrente de arco máxima. Para se obter o valor da corrente de arco mínima, a equação (4.7) é processada diretamente no corpo do script.

5.4 Modo de utilização

5.4.1 1ª etapa: Preparação dos dados de entrada

Os dados de entrada devem ser preenchidos numa planilha em formato Microsoft Excel, salva no diretório de trabalho do MATLAB com o nome “SystemInfo.xlsx”.

A primeira linha da planilha (cabeçalho) deve conter os nomes dos parâmetros que serão lidos pelo script, conforme indicado na Figura 5.4. Deve-se atentar ao fato de que o MATLAB é *case sensitive*, *i.e.*, é sensível a maiúsculas e minúsculas.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1	Name	Config	Voc_kV	Ibf_kA	Gap_mm	WkD_mm	H_mm	W_mm	D_mm
2	PN-01	VCBB	13,8	15	152	914,4	1000	800	900
3	PN-02	VCBB	13,8	20	152	914,4	1000	800	900
4	PN-03	VCBB	4,16	7,5	104	914,4	750	500	500
5	PN-04	VCBB	4,16	10	104	914,4	750	500	500
6	PN-05	VCBB	0,48	30	32	609,6	750	500	500
7	PN-06	VCBB	0,48	50	32	609,6	750	500	500

Figura 5.4 – Modo de utilização: Planilha de entrada de dados.

A partir da segunda linha, devem ser informados os parâmetros de cada ponto a ser estudado. A descrição dos parâmetros se encontra no Quadro 5.2.

Quadro 5.2 – Modo de utilização: Descrição dos dados de entrada.

Parâmetro	Descrição
Name	Campo livre, deve conter a identificação do equipamento ou compartimento.
Config	Código de configuração de eletrodo, em letras maiúsculas, conforme 4.3.1.3.
Voc_kV	Tensão de circuito aberto do sistema, em kV.
Ibf_kA	Corrente de falta franca trifásica, em kA.
Gap_mm	Espaçamento entre eletrodos, em mm.
WkD_mm	Distância de trabalho, em mm.
H_mm	Altura do invólucro, em mm.
W_mm	Largura do invólucro, em mm.
D_mm	Profundidade do invólucro, em mm.

5.4.2 2ª etapa: Inicialização do script e cálculo da corrente de arco

O script é inicializado pelo comando “IEEE1584_2018”, e sua primeira ação é a leitura das informações do arquivo “SystemInfo.xlsx” para preparação e avaliação dos dados pela função *checkdata*, conforme 5.3.1. Se os dados forem validados com sucesso, o script calculará as correntes de arco, salvando os resultados num arquivo chamado de “Iarc.xlsx”. As correntes máximas constam na aba “IarcMax”, e as mínimas na aba “IarcMin”, conforme Figura 5.5.

	A	B	C	D
1	Name	Config	Iarcmax_kA	
2	PN-01	VCBB	14,33113417	
3	PN-02	VCBB	19,06504326	
4	PN-03	VCBB	6,831084742	
5	PN-04	VCBB	9,05442236	
6	PN-05	VCBB	23,72423606	
7	PN-06	VCBB	34,95131712	

Navigation: IarcMax | IarcMin | +

Figura 5.5 – Modo de utilização: Planilha com as correntes de arco.

Feito isto, o script solicitará que o usuário preencha as durações de arco na planilha “Iarc.xlsx” e aguardará seu comando para continuar os cálculos.

5.4.3 3ª etapa: Interação com o Estudo de Seletividade da Proteção

Nesta etapa, o usuário deverá avaliar e preencher a duração de arco para cada corrente de arco calculada. Os valores devem ser inseridos na planilha “Iarc.xlsx”, numa coluna identificada com o cabeçalho “T_ms” em cada uma das abas (“IarcMax” e “IarcMin”), conforme Figura 5.6.

	A	B	C	D
1	Name	Config	Iarcmax_kA	T_ms
2	PN-01	VCBB	14,33113417	200
3	PN-02	VCBB	19,06504326	200
4	PN-03	VCBB	6,831084742	200
5	PN-04	VCBB	9,05442236	200
6	PN-05	VCBB	23,72423606	200
7	PN-06	VCBB	34,95131712	200

Navigation: IarcMax | IarcMin | +

Figura 5.6 – Modo de utilização: Planilha com as durações de arco.

Após salvar o arquivo, o usuário deverá efetuar um comando “enter” para dar continuidade à execução do script, retomando a sequência de cálculos até o final.

5.4.4 4ª etapa: Resultados e encerramento

O script salvará os resultados num arquivo chamado de “Results.xlsx”. Os resultados parciais, calculados com as correntes de arco máxima e mínima, se encontram, respectivamente, nas abas “Results_IarcMax” e “Results_IarcMin”.

O resultado final, conforme estabelecido pela IEEE Std 1584-2018, deve ser o pior caso entre as duas avaliações, que é indicado na aba “Results_WorstCase”, conforme Figura 5.7.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1	Name	Config	Voc_kV	WorstCase	Iarc_kA	Tarc_ms	E_Jcm2	E_calcm2	AFB_mm
2	PN-01	VCBB	13,8	IarcMin	14,05973593	300	36,67722508	8,766067179	2987,897127
3	PN-02	VCBB	13,8	IarcMin	18,70399584	300	49,46952481	11,82350019	3570,686972
4	PN-03	VCBB	4,16	IarcMin	6,683286328	300	14,69288001	3,511682602	1698,749365
5	PN-04	VCBB	4,16	IarcMin	8,858519467	300	19,97501634	4,774143484	2028,44343
6	PN-05	VCBB	0,48	IarcMin	20,91590734	300	47,5582914	11,36670445	2112,613983
7	PN-06	VCBB	0,48	IarcMin	30,8139958	300	73,26739656	17,51132805	2682,690514

Figura 5.7 – Modo de utilização: Planilha com resultados.

5.5 Validação numérica

5.5.1 Comparação com o exemplo do Anexo D da IEEE Std 1584-2018

A primeira validação numérica para o script desenvolvido foi realizar a comparação com os exemplos fornecidos no Anexo D da IEEE Std 1584-2018. Neste anexo há dois exemplos numéricos, um em média tensão e outro em baixa tensão, cujos dados de entrada estão na Figura 5.8.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1	Name	Config	Voc_kV	Ibf_kA	Gap_mm	WkD_mm	H_mm	W_mm	D_mm
2	AnnexD1	VCB	4,16	15	104	914,4	1143	762	254
3	AnnexD2	VCB	0,48	45	32	609,6	610	610	254

Figura 5.8 – Validação 1: Dados de entrada (Anexo D da IEEE Std 1584-2018).

No Quadro 5.3 são apresentados os resultados dos exemplos numéricos do Anexo D da IEEE Std 1584-2018 relativos às correntes de arco máximas.

Quadro 5.3 – Validação 1: Resultados com I_{arcmax} (Anexo D da IEEE Std 1584-2018).

Name	E.C.	V_{oc} [kV]	I_{arc} [kA]	T_{arc} [ms]	E [J/cm ²]	E [cal/cm ²]	AFB [mm]
AnnexD1	VCB	4,16	12,979	197	12,152	2,904	1.606
AnnexD2	VCB	0,48	28,793	61,3	11,585	2,769	1.029

Na Figura 5.9 constam os resultados obtidos pelo script. Pode-se verificar que os resultados são precisamente os mesmos.

	A	B	C	D	E	F	G	H
1	Name	Config	Voc_kV	Iarcmax_kA	Tmax_ms	Emax_Jcm2	Emax_calcm2	AFBmax_mm
2	AnnexD1	VCB	4,16	12,979	197	12,152	2,904	1606
3	AnnexD2	VCB	0,48	28,793	61,3	11,585	2,769	1029

Figura 5.9 – Validação 1: Resultados com I_{arcmax} (script).

No Quadro 5.4 são apresentados os resultados dos exemplos numéricos do Anexo D da IEEE Std 1584-2018 relativos às correntes de arco mínimas.

Quadro 5.4 – Validação 1: Resultados com I_{arcmin} (Anexo D da IEEE Std 1584-2018).

Name	$E.C.$	V_{oc} [kV]	I_{arc} [kA]	T_{arc} [ms]	E [J/cm ²]	E [cal/cm ²]	AFB [mm]
AnnexD1	VCB	4,16	12,675	223	13,343	3,189	1.704
AnnexD2	VCB	0,48	25,244	319	53,156	12,704	2.669

Finalmente, na Figura 5.10 constam os resultados obtidos pelo script, chegando aos mesmos valores do exemplo da norma.

	A	B	C	D	E	F	G	H
1	Name	Config	Voc_kV	Iarcmin_kA	Tmin_ms	Emin_Jcm2	Emin_calcm2	AFBmin_mm
2	AnnexD1	VCB	4,16	12,675	223	13,343	3,189	1704
3	AnnexD2	VCB	0,48	25,244	319	53,157	12,705	2669

Figura 5.10 – Validação 1: Resultados com I_{arcmin} (script).

Este exemplo da norma é bastante útil, porém limitado, pois apenas a configuração de eletrodo VCB é avaliada.

5.5.2 Comparação com o software online ArcAdvisor

Visando validar o script com uma gama mais ampla de parâmetros, foi realizada a comparação dos resultados obtidos pelo script desenvolvido com os resultados de um software comercial.

O aplicativo ArcAdvisor [42] é uma ferramenta online que realiza o cálculo da energia incidente e do limite de aproximação segura pelo método IEEE Std 1584-2018, desenvolvido pela empresa canadense ARCAD INC.

Não é necessário nenhum tipo de instalação, o aplicativo é acessado pelo navegador de internet. Uma imagem da página inicial do ArcAdvisor é apresentada na Figura 5.11.

Os dados devem ser informados através de formulários online, e após a execução dos cálculos, os resultados podem ser visualizados no próprio navegador ou ser exportados em formato texto. Ao contrário do script desenvolvido, em que uma grande quantidade de cálculos pode ser facilmente realizada em função da facilidade de manipulação de dados através de planilhas do Microsoft Excel, o ArcAdvisor é mais adequado para cálculos pontuais.

O ArcAdvisor requer uma licença válida para utilização completa dos seus recursos (incluindo cálculos em média tensão). Para o desenvolvimento deste trabalho, uma licença temporária de avaliação foi gentilmente cedida pela ARCAD INC.

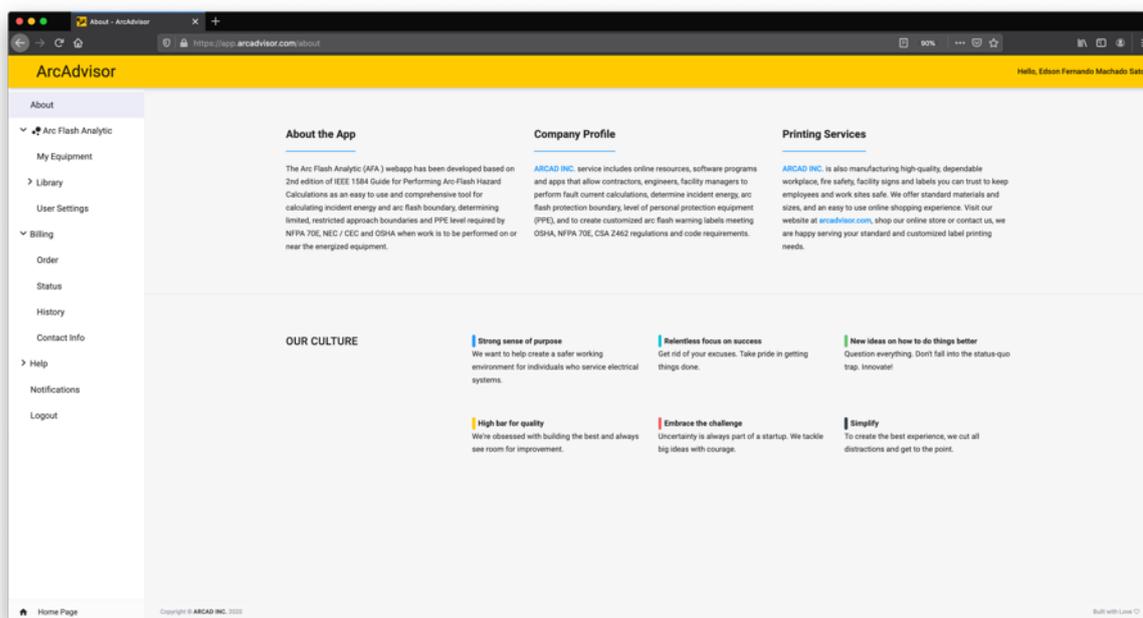


Figura 5.11 – ArcAdvisor: Página inicial.

Para esta validação, foram escolhidos três níveis de tensão de circuito aberto (13,8, 4,16 e 0,48 kV), e para cada um destes níveis foi realizado o cálculo para as cinco opções possíveis de configuração de eletrodo. Os demais parâmetros foram arbitrados, dando-se preferência para valores típicos, quando existentes, conforme Figura 5.12.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1	Name	Config	Voc_kV	lbf_kA	Gap_mm	WkD_mm	H_mm	W_mm	D_mm
2	HV1	VCB	13,8	15	152	914,4	1143	762	762
3	HV2	VCBB	13,8	15	152	914,4	1143	762	762
4	HV3	HCB	13,8	15	152	914,4	1143	762	762
5	HV4	VOA	13,8	15	152	914,4			
6	HV5	HOA	13,8	15	152	914,4			
7	MV1	VCB	4,16	20	104	914,4	1143	762	762
8	MV2	VCBB	4,16	20	104	914,4	1143	762	762
9	MV3	HCB	4,16	20	104	914,4	1143	762	762
10	MV4	VOA	4,16	20	104	914,4			
11	MV5	HOA	4,16	20	104	914,4			
12	LV1	VCB	0,48	30	32	609,6	508	508	508
13	LV2	VCBB	0,48	30	32	609,6	508	508	508
14	LV3	HCB	0,48	30	32	609,6	508	508	508
15	LV4	VOA	0,48	30	32	609,6			
16	LV5	HOA	0,48	30	32	609,6			

Figura 5.12 – Validação 2: Dados de entrada (ArcAdvisor).

As durações de arco arbitradas foram 150 ms para a corrente de arco máxima e 300 ms para a corrente de arco mínima.

O Quadro 5.5 apresenta os resultados obtidos pelo ArcAdvisor para os sistemas elétricos fictícios propostos, considerando as correntes de arco máximas.

Quadro 5.5 – Validação 2: Resultados com I_{arcmax} (ArcAdvisor).

Name	E.C.	V_{oc} [V]	I_{arc} [kA]	T_{arc} [s]	E [cal/cm ²]	AFB [mm]
HV1	VCB	13.800	14	0,15	2,5	1.466
HV2	VCBB	13.800	14,33	0,15	4,3	1.951
HV3	HCB	13.800	13,55	0,15	5,8	2.358
HV4	VOA	13.800	12,65	0,15	2,1	1.298
HV5	HOA	13.800	13,31	0,15	4,9	2.152
MV1	VCB	4.160	17,21	0,15	2,9	1.609
MV2	VCBB	4.160	17,85	0,15	4,4	1.938
MV3	HCB	4.160	17,57	0,15	6,8	2.502
MV4	VOA	4.160	16,53	0,15	1,8	1.202
MV5	HOA	4.160	16,87	0,15	5,1	2.196
LV1	VCB	480	21,46	0,15	5,3	1.546
LV2	VCBB	480	23,72	0,15	7,1	1.625
LV3	HCB	480	20,76	0,15	9,6	1.696
LV4	VOA	480	18,48	0,15	2,5	966
LV5	HOA	480	15,5	0,15	4,7	1.206

A Figura 5.13 apresenta os resultados obtidos pelo script desenvolvido.

	A	B	C	D	E	F	G	H
1	Name	Config	Voc_kV	Iarcmax_kA	Tmax_ms	Emax_Jcm2	Emax_calcm2	AFBmax_mm
2	HV1	VCB	13,8	14,00	150	10,5	2,5	1466
3	HV2	VCBB	13,8	14,33	150	17,9	4,3	1951
4	HV3	HCB	13,8	13,55	150	24,1	5,8	2358
5	HV4	VOA	13,8	12,65	150	8,6	2,1	1298
6	HV5	HOA	13,8	13,31	150	20,3	4,9	2152
7	MV1	VCB	4,16	17,21	150	12,2	2,9	1609
8	MV2	VCBB	4,16	17,85	150	18,5	4,4	1938
9	MV3	HCB	4,16	17,57	150	28,2	6,7	2502
10	MV4	VOA	4,16	16,53	150	7,6	1,8	1202
11	MV5	HOA	4,16	16,87	150	21,1	5,0	2196
12	LV1	VCB	0,48	21,46	150	22,2	5,3	1546
13	LV2	VCBB	0,48	23,72	150	29,6	7,1	1626
14	LV3	HCB	0,48	20,76	150	40,1	9,6	1696
15	LV4	VOA	0,48	18,48	150	10,5	2,5	967
16	LV5	HOA	0,48	15,50	150	19,5	4,7	1206

Figura 5.13 – Validação 2: Resultados com I_{arcmax} (script).

Verifica-se que os resultados obtidos através do script desenvolvido são praticamente os mesmos obtidos pelo ArcAdvisor, apresentando apenas algumas diferenças devido aos arredondamentos aplicados.

O Quadro 5.6 apresenta os resultados obtidos pelo ArcAdvisor para os sistemas elétricos fictícios propostos, considerando as correntes de arco mínimas.

Quadro 5.6 – Validação 2: Resultados com I_{arcmin} (ArcAdvisor).

Name	$E.C.$	V_{oc} [V]	I_{arc} [kA]	T_{arc} [s]	E [cal/cm ²]	AFB [mm]
HV1	VCB	13.800	13,83	0,3	5,1	2.301
HV2	VCBB	13.800	14,06	0,3	8,7	2.958
HV3	HCB	13.800	13,4	0,3	11,4	3.543
HV4	VOA	13.800	12,44	0,3	4,2	2.061
HV5	HOA	13.800	12,89	0,3	8,8	3.094
MV1	VCB	4.160	16,81	0,3	5,7	2.453
MV2	VCBB	4.160	17,46	0,3	8,9	2.909
MV3	HCB	4.160	17,1	0,3	13,2	3.703
MV4	VOA	4.160	16,23	0,3	3,8	1.955
MV5	HOA	4.160	16,28	0,3	10,1	3.344
LV1	VCB	480	18,81	0,3	9,4	2.204
LV2	VCBB	480	20,92	0,3	12,2	2.195
LV3	HCB	480	17,9	0,3	16,5	2.212
LV4	VOA	480	16,26	0,3	4,4	1.377
LV5	HOA	480	13,35	0,3	8	1.581

A Figura 5.14 apresenta os resultados obtidos pelo script desenvolvido.

	A	B	C	D	E	F	G	H
	Name	Config	Voc_kV	Iarcmin_kA	Tmin_ms	Emin_Jcm2	Emin_calcm2	AFBmin_mm
1	HV1	VCB	13,8	13,83	300	21,4	5,1	2302
2	HV2	VCBB	13,8	14,06	300	36,1	8,6	2958
3	HV3	HCB	13,8	13,40	300	47,4	11,3	3544
4	HV4	VOA	13,8	12,44	300	17,5	4,2	2061
5	HV5	HOA	13,8	12,89	300	36,8	8,8	3094
6	MV1	VCB	4,16	16,81	300	23,6	5,6	2453
7	MV2	VCBB	4,16	17,46	300	37,3	8,9	2909
8	MV3	HCB	4,16	17,10	300	55,1	13,2	3703
9	MV4	VOA	4,16	16,23	300	16,0	3,8	1955
10	MV5	HOA	4,16	16,28	300	42,0	10,0	3344
11	LV1	VCB	0,48	18,81	300	39,2	9,4	2204
12	LV2	VCBB	0,48	20,92	300	51,0	12,2	2195
13	LV3	HCB	0,48	17,90	300	68,7	16,4	2212
14	LV4	VOA	0,48	16,26	300	18,5	4,4	1377
15	LV5	HOA	0,48	13,35	300	33,4	8,0	1581

Figura 5.14 – Validação 2: Resultados com I_{arcmin} (script).

Como houve concordância de todos os resultados, abrangendo os dois modelos matemáticos (até 600 V, e acima de 600 V) e todas as configurações de eletrodo, pode-se considerar que o script implementado representa corretamente o método IEEE Std 1584-2018.

5.5.3 Comparação com o exemplo publicado por Das

Um dos poucos livros que abordam o método IEEE Std 1584-2018, é o “*Arc Flash Hazard – Analysis and Mitigation – 2nd Edition*” [43], de J.C. Das, publicado em 2021.

Este livro apresenta um exemplo numérico, indicado na Figura 5.15.

TABLE 3.9. Arc Fault Calculations According to IEEE 5184, 2002 Versus 2018 Editions

Relay Time (s)	IEEE 1584, 2002 Edition			IEEE 1584 2018 Edition, HCB		
	Arcing Current (kA)	Arc Flash Boundary (in)	Incident Energy (cal/cm ²)	Arcing Current (kA)	Arc Flash Boundary (in)	Incident Energy (cal/cm ²)
0.0042	28.58	68	2.8	27.20	79	4.99
0.0125	28.58	81	3.3	27.20	87	5.11
0.025	28.58	96	3.9	27.20	97	6.14
0.05	28.58	129	5.2	27.20	115	8.18
0.1	28.58	247	7.8	27.20	147	12.7
0.2	28.58	418	13	27.20	200	20.5
0.3	28.58	519	18	27.20	245	28.6
0.4	28.58	764	23	27.20	285	36.8
0.5	28.58	939	29	27.20	321	45
0.6	28.58	1115	34	27.20	355	53.2
0.7	28.58	1292	39	27.20	387	61.4
0.8	28.58	1469	44	27.20	418	69.6
1.0	28.58	1825	54	27.20	475	85.9
1.25	28.58	2273	67	27.20	540	106.4
1.5	28.58	2724	80	27.20	600	126.8
1.75	28.58	3176	93	27.20	657	147.3
2.0	28.58	3630	106	27.20	711	167.7

Bolted three-phase fault current 30 kA, system voltage 13.8 kV, gap length =152 mm, working distance =36", box dimensions 26"Wx 95" deep, 96" High, Circuit breaker opening time=3 cycles.

Figura 5.15 – Validação 3: Resultados do exemplo numérico publicado por Das [43].

Os cálculos foram realizados pelo script, com os mesmos dados de entrada, e os resultados se encontram na Figura 5.16.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1	Name	Config	Voc_kv	WorstCase	larc_kA	Tarc_ms	E_calcm2	AFB_mm	AFB_in
2	Das1	HCB	13,8	larcMax	27,20	54,2	4,44	2.012	79,2
3	Das2	HCB	13,8	larcMax	27,20	62,5	5,11	2.193	86,3
4	Das3	HCB	13,8	larcMax	27,20	75	6,14	2.448	96,4
5	Das4	HCB	13,8	larcMax	27,20	100	8,18	2.912	114,6
6	Das5	HCB	13,8	larcMax	27,20	150	12,27	3.719	146,4
7	Das6	HCB	13,8	larcMax	27,20	250	20,46	5.061	199,3
8	Das7	HCB	13,8	larcMax	27,20	350	28,64	6.200	244,1
9	Das8	HCB	13,8	larcMax	27,20	450	36,82	7.215	284,1
10	Das9	HCB	13,8	larcMax	27,20	550	45,01	8.144	320,6
11	Das10	HCB	13,8	larcMax	27,20	650	53,19	9.008	354,6
12	Das11	HCB	13,8	larcMax	27,20	750	61,37	9.820	386,6
13	Das12	HCB	13,8	larcMax	27,20	850	69,55	10.590	416,9
14	Das13	HCB	13,8	larcMax	27,20	1050	85,92	12.031	473,6
15	Das14	HCB	13,8	larcMax	27,20	1300	106,38	13.685	538,8
16	Das15	HCB	13,8	larcMax	27,20	1550	126,83	15.218	599,1
17	Das16	HCB	13,8	larcMax	27,20	1800	147,29	16.654	655,7
18	Das17	HCB	13,8	larcMax	27,20	2050	167,75	18.014	709,2

Figura 5.16 – Validação 3: Resultados pelo script.

Os resultados foram os mesmos. Cabe comentar que há uma divergência no primeiro valor de energia incidente, que no livro é indicado como 4,99 cal/cm², e pelo script foi calculado como 4,44 cal/cm². Uma análise simples permite perceber que, no problema proposto por Das, o único parâmetro variável foi a duração de arco. Tendo conhecimento da relação linear entre a energia incidente e a duração de arco, é esperado que todos os valores resultantes de energia incidente estejam sobre uma reta. Assim, conclui-se que o livro apresenta um erro de digitação, e o valor correto é o valor calculado pelo script.

5.6 Considerações finais

O presente capítulo descreveu o script de cálculo desenvolvido, e apresentou o processo utilizado para considerá-lo validado.

Uma característica do script que pode ser atestada, é a flexibilidade proporcionada pelo uso das planilhas em Microsoft Excel como meio de entrada e saída de dados. Além da facilidade com a manipulação, que permite calcular inúmeros casos em uma única execução, também permite modificações de conveniência, como no caso da comparação com o exemplo de Das, discutido em 5.5.3, onde foi necessária a conversão do resultado de *AFB* de milímetros (conforme norma) para polegadas (conforme publicado pelo autor) para comparação de valores.

6 ANÁLISES DE SENSIBILIDADE

6.1 Considerações iniciais

Por fazer uso de uma planilha do Microsoft Excel como meio de entrada de dados, o script desenvolvido oferece certa facilidade para a realização de análise de sensibilidade das variáveis envolvidas no cálculo de energia incidente. Assim, para se analisar o efeito da variação de certo parâmetro dentro de uma faixa de valores de interesse, basta preencher a planilha considerando cada linha como um ponto da curva e executar o script, que irá realizar o cálculo completo de energia incidente para cada ponto, e o resultado poderá ser utilizado para gerar gráficos em qualquer aplicativo da preferência do usuário.

Esta flexibilidade não é comum nos aplicativos comerciais, pois estes são concebidos para determinar pontualmente a energia incidente (E) e o limite de aproximação segura (AFB), calculada apenas na distância de trabalho (D).

Nesta parte da pesquisa, o script será aplicado como ferramenta para se estudar e melhor compreender a influência dos parâmetros do modelo matemático no resultado da energia incidente.

6.2 Análises realizadas

6.2.1 Influência da configuração de eletrodo

A utilização da configuração de eletrodo no cálculo da energia incidente é uma das principais mudanças introduzidas pela IEEE Std 1584-2018. Possivelmente, também é o ponto mais comentado pela comunidade técnica acerca desta nova Edição, uma vez que este parâmetro, cuja definição é obrigatória para execução da sequência de cálculos, é uma informação que não está facilmente disponível à maioria dos usuários da norma. Para a atualização de um estudo da Edição de 2002 para a Edição de 2018, este parâmetro deve ser estabelecido para todos os pontos para os quais se deseja calcular a energia incidente.

Utilizando-se como exemplo os equipamentos de 13,8 kV propostos em 5.5.2 (HV1 a HV5), que podem ser considerados o “mesmo equipamento”, pois possuem os mesmos parâmetros elétricos e mecânicos, salvo a configuração de eletrodo (única diferença), obtém-se o resultado mostrado na Figura 6.1.

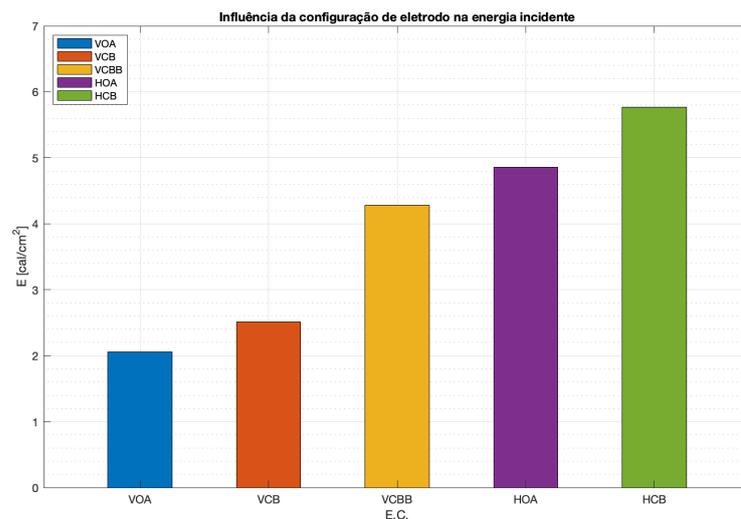


Figura 6.1 – Influência da configuração de eletrodo na energia incidente.

Alguns comportamentos do arco elétrico podem ser verificados com base nestes resultados:

- O invólucro tem um efeito amplificador da energia incidente, fato que pode ser verificado comparando-se as configurações cujos eletrodos estão na mesma posição, mas com a diferença de estarem ou não dentro de um invólucro.
 - $E_{VOA} < E_{VCB}$ (eletrodos verticais: sem invólucro vs. com invólucro);
 - $E_{HOA} < E_{HCB}$ (eletrodos horizontais: sem invólucro vs. com invólucro).
- As configurações horizontais resultam em energia incidente maior do que as configurações verticais, com base no fato de que o arco elétrico “caminha” para as pontas do eletrodo, se afastando da fonte.
 - $E_{VCB} < E_{HCB}$ (eletrodos com invólucro: verticais vs. horizontais);
 - $E_{VOA} < E_{HOA}$ (eletrodos sem invólucro: verticais vs. horizontais).
- Uma barreira isolante posicionada ao final dos eletrodos tende a canalizar a energia do arco para a direção do trabalhador exposto, aumentando a energia incidente com relação à configuração sem barreira isolante, mas não chegando ao nível de energia incidente dos eletrodos horizontais.
 - $E_{VCB} < E_{VCBB} < E_{HCB}$ (eletrodos com invólucro).
- Tomando como referência a configuração de menor energia incidente (VOA), verifica-se que a simples modificação da posição do eletrodo para horizontal (HOA) tem um efeito mais importante do que a inclusão do mesmo num invólucro (VCB).
 - $E_{VOA} < E_{VCB} < E_{HOA}$ (posição vs. invólucro).

É importante ressaltar que a modelagem considera a energia incidente a uma distância de trabalho posicionada em frente ao equipamento.

6.2.2 Influência da duração de arco

A relação da energia incidente com a duração de arco é linear, de acordo com as equações (4.10) a (4.13). Esta característica pode ser confirmada através do script, bastando inserir o mesmo ponto de interesse repetidas vezes na planilha de dados de entrada, onde cada linha representará um passo de tempo que será calculado. Na planilha de resultados das correntes de arco, deve-se inserir o tempo numa coluna com cabeçalho “T_ms”, iniciando-se do menor valor (*e.g.* 20 ms) até um valor máximo (*e.g.* 2 s). Desta forma, o script salvará na planilha de resultados finais os resultados de energia incidente para cada passo de tempo informado, podendo ser apresentados em forma de gráfico se o usuário assim o desejar. A Figura 6.2 ilustra este procedimento aplicado aos equipamentos de 13,8 kV do exemplo proposto em 5.5.2, considerando apenas a corrente de arco máxima.

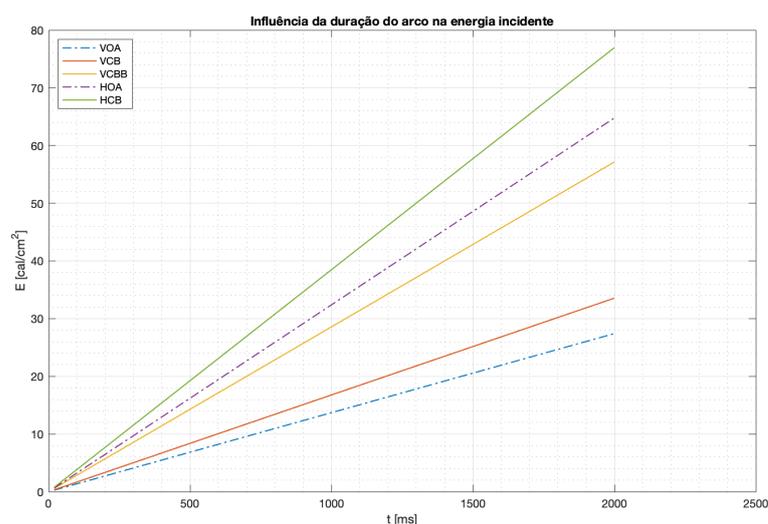


Figura 6.2 – Influência da duração de arco na energia incidente.

Com este recurso, o usuário pode, por exemplo, definir a maior duração de arco que resulta numa energia incidente que é adequada à Classificação de Arco dos EPIs disponíveis para a realização de um determinado serviço. Com a duração de arco, pode-se determinar o tempo de ajuste da proteção.

6.2.3 Influência da distância de trabalho

Por padrão, a energia incidente é sempre calculada para a distância de trabalho. No entanto, a norma admite que, para uma análise específica, pode ser calculada a energia incidente para qualquer outra distância.

Nestes casos, uma análise gráfica é conveniente, em virtude do comportamento inversamente exponencial da energia incidente em relação à distância. A Figura 6.3 ilustra claramente este comportamento ao variar a distância de trabalho relativa aos equipamentos de 13,8 kV do exemplo proposto em 5.5.2.

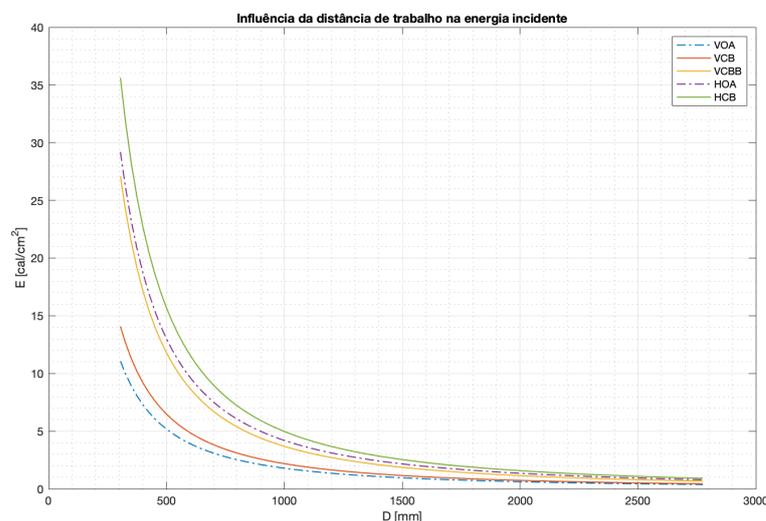


Figura 6.3 – Influência da distância de trabalho na energia incidente.

Com este tipo de gráfico, o usuário pode avaliar qual a Classificação de Arco necessária para se realizar um serviço mais próximo da fonte do arco do que a distância de trabalho padronizada, e até que distância um trabalhador estará protegido com os EPIs disponíveis.

Distâncias menores do que 305 mm estão fora do escopo da norma, pois supõe-se que a nuvem de plasma pode se expandir até uma distância de 12 polegadas (305 mm) do centro do arco. Pelo gráfico pode-se notar que, à medida que se vai ao encontro da fonte do arco, a tendência exponencial indica que valores intoleráveis de energia incidente seriam atingidos para distâncias pouco abaixo de 305 mm.

6.2.4 Influência do tamanho do invólucro

Para a análise da influência do tamanho do invólucro na energia incidente, foram utilizados os parâmetros dos equipamentos de 13,8 kV do exemplo proposto em 5.5.2, alterando-se a altura e a largura do invólucro, e excluindo da análise os equipamentos sem invólucro. Para os sistemas de média tensão, a profundidade não é considerada no cálculo.

A Figura 6.4 mostra variação da energia incidente pela área de abertura do invólucro. Para esta simulação, foi considerada uma abertura quadrada, com a área variando do menor (largura de quatro vezes o espaçamento entre eletrodos) até o maior valor permitido (1,549 m²).

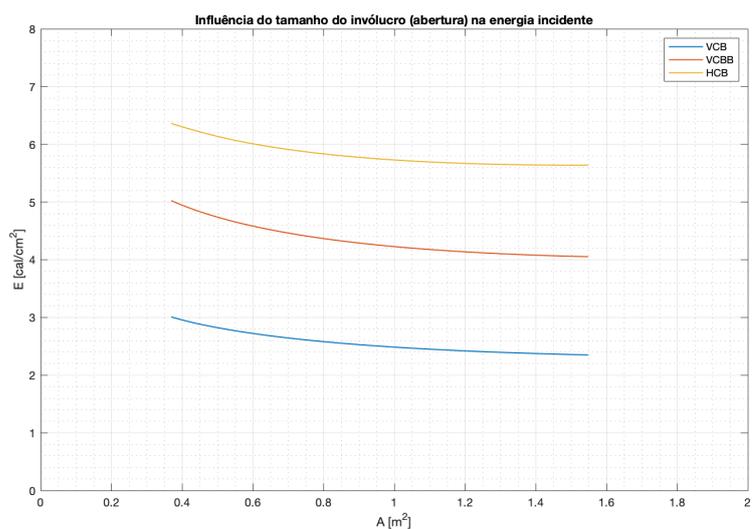


Figura 6.4 – Influência do tamanho do invólucro (abertura) na energia incidente.

Quanto maior a abertura (ou o invólucro), menor a energia incidente, fazendo com que o resultado se aproxime do valor obtido com a configuração do eletrodo sem invólucro.

6.2.5 Influência do espaçamento entre eletrodos

A Figura 6.5 ilustra o efeito da variação do espaçamento entre eletrodos na energia incidente, para os equipamentos de 13,8 kV do exemplo apresentado em 5.5.2.

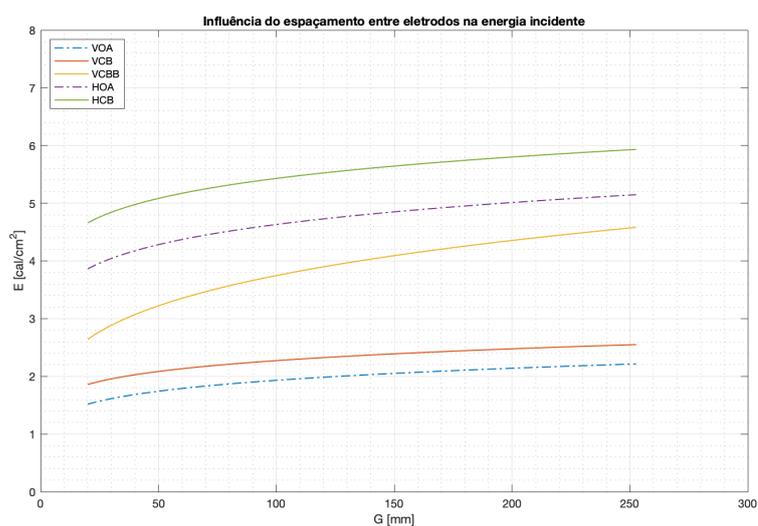


Figura 6.5 – Influência do espaçamento entre eletrodos na energia incidente.

Conforme já declarado na norma, a energia incidente aumenta com o tamanho do espaçamento entre eletrodos, porém é um efeito de menor importância.

6.2.6 Influência da tensão na variação da corrente de arco

Conforme já discutido, a corrente de arco apresenta instabilidade em sistemas com tensão nominal abaixo de 600 V. A Figura 6.6 mostra o valor percentual da mínima corrente de arco calculada pelo modelo em relação à corrente máxima para sistemas $0,208 \leq V_{oc} \leq 0,6$ kV. Para a simulação, foi considerado a configuração VCB com $I_{bf} = 10$ kA e $G = 32$ mm.

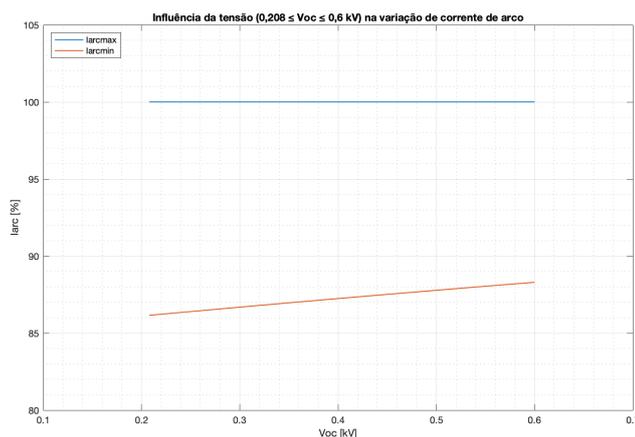


Figura 6.6 – Influência da tensão ($0,208 \leq V_{oc} \leq 0,6$ kV) na variação de corrente de arco.

A Figura 6.7 mostra a mínima corrente de arco para sistemas com $V_{oc} > 0,6$ kV (VCB, $I_{bf} = 10$ kA, $G = 152$ mm).

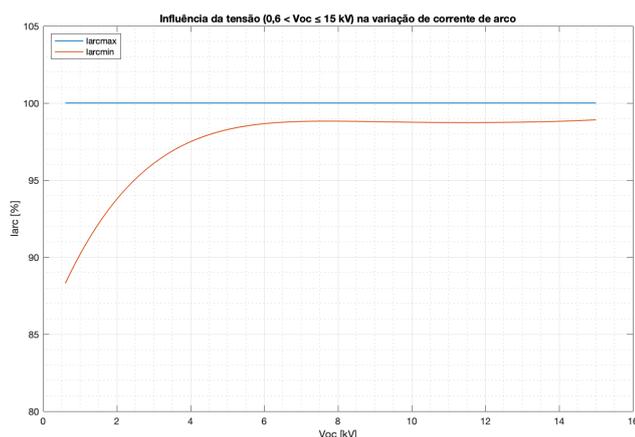


Figura 6.7 – Influência da tensão ($0,6 < V_{oc} \leq 15$ kV) na variação de corrente de arco.

Pode-se verificar que, à medida que a tensão de circuito aberto do sistema aumenta, o valor da mínima corrente de arco se aproxima do valor máximo, sendo muito pequena a diferença nos sistemas de 13,8 kV. Na edição de 2002 da IEEE Std 1584, a relação era fixa em 85%.

6.3 Considerações finais

As análises realizadas neste capítulo não são comumente executadas em um estudo de energia incidente. Elas foram propostas com o intuito acadêmico de ilustrar e reforçar o conhecimento sobre a influência de cada grandeza no resultado do estudo.

Os valores utilizados foram arbitrários, de modo que as análises podem ser realizadas com outros dados de entrada, em que se espera que ocorram variações de intensidade, mas com a mesma relação de dependência entre as grandezas.

7 ESTUDO DE CASO 1 – CORRENTE CONSTANTE

7.1 Considerações iniciais

Neste primeiro estudo de caso, será apresentado um estudo de energia incidente “convencional”, *i.e.*, um estudo em que as contribuições de curto-circuito são consideradas constantes por toda a duração do arco.

7.2 Apresentação do sistema

O estudo de energia incidente foi desenvolvido em um conjunto de manobra e comando de 480 V, cujo *tag* de identificação é PN-02 (Figura 7.1).



Figura 7.1 – PN-02: Conjunto de manobra e comando do estudo de caso.

Fisicamente, o equipamento possui as seguintes características:

- Duas colunas de entrada (A e B), do tipo CDC, com entrada de cabos pelos compartimentos inferiores, onde ficam os TCs. Os compartimentos intermediários contam com disjuntores abertos (tipo PCB) extraíveis, e os compartimentos superiores abrigam a parte de comando com IEDs de proteção;

- Uma coluna de interligação (C), do tipo CDC, com disjuntor aberto (tipo PCB) extraível no compartimento intermediário, que faz a conexão entre os lados A e B do barramento de força. O compartimento superior abriga o IED de proteção;
- Duas colunas de transição entre as barras das colunas centrais (do tipo CDC) com as barras das colunas laterais (do tipo CCM), que possuem profundidades diferentes;
- Quatro colunas de saída, do tipo CCM, cujas unidades funcionais (gavetas dos TPs⁵⁰ e dos demarradores das cargas) são extraíveis, e as seções de saídas de cabos não possuem compartimentação interna.

As entradas são alimentadas por dois transformadores de 300 kVA (TF-01A e TF-01B), que por sua vez estão conectados na média tensão a dois painéis de 13,8 kV (PN-01A e PN-01B), que recebem energia de alimentadores independentes (A e B), conforme Figura 7.2.

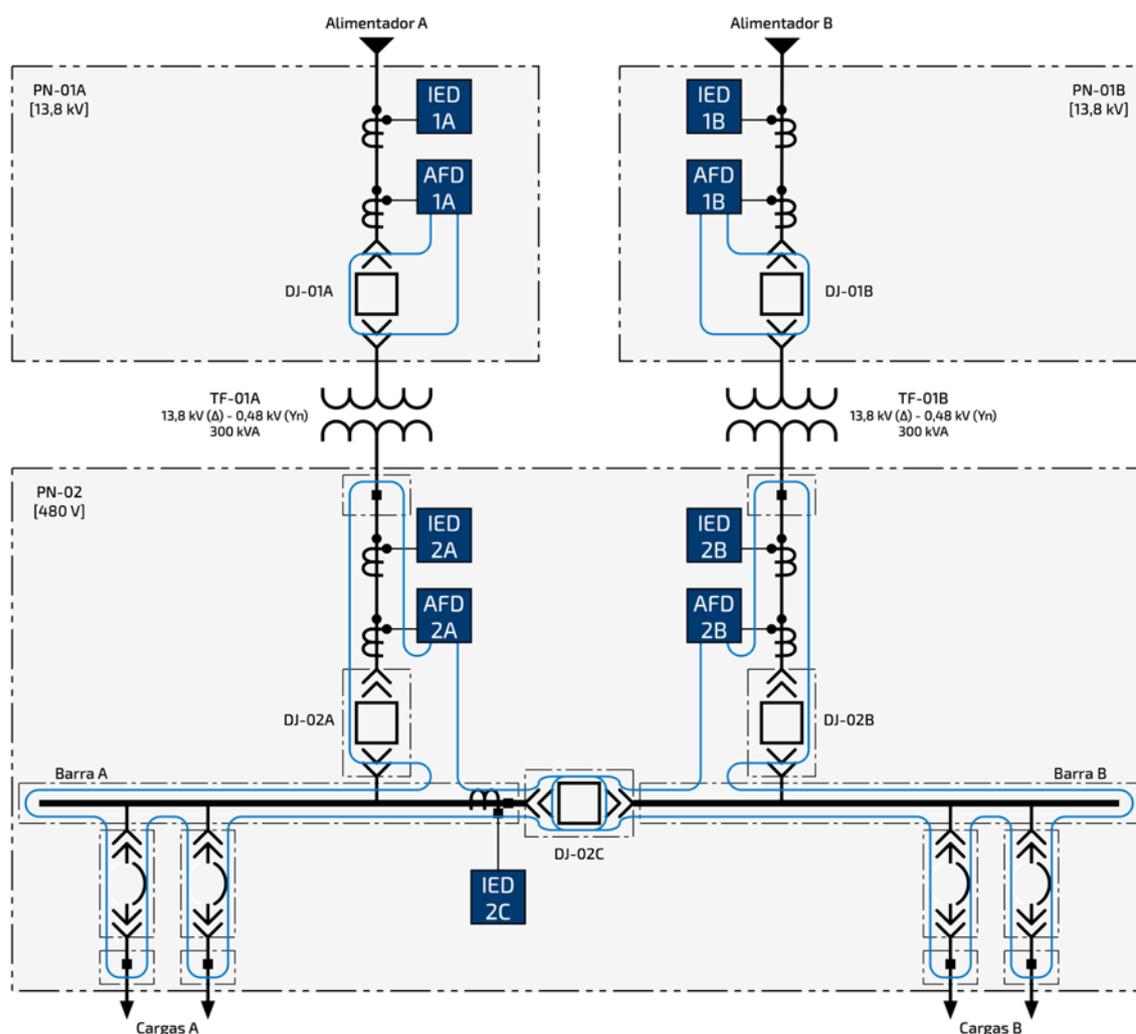


Figura 7.2 – PN-02: Diagrama unifilar simplificado.

⁵⁰ TP: Transformador de Potencial.

Os IEDs do PN-02 estão conectados a uma rede de automação elétrica dedicada, baseada na norma IEC 61850, que possibilita a troca de comandos com os IEDs dos painéis de média tensão (PN-01A e PN-01B).

O PN-02 também conta com proteção contra arco elétrico, realizada através de dois AFDs⁵¹ dedicados, cada um com sensor do tipo regional (fibra desencapada) que cobre metade da barra, passando pelas colunas de entrada, de dispositivos (demarradores e TPs) e de saída, até a coluna de interligação, onde há uma sobreposição com a fibra da outra barra.

7.3 Levantamento de dados

7.3.1 Dados mecânicos e construtivos

7.3.1.1 Determinação dos compartimentos a serem avaliados

A Edição 2018 da IEEE Std 1584 passou a considerar a configuração de eletrodo e as dimensões de invólucro no cálculo de energia incidente. Isto significa que compartimentos com características construtivas diferentes em um mesmo conjunto de manobra e comando podem proporcionar valores distintos de energia incidente.

Em função da diversidade de parâmetros envolvidos, é difícil saber de antemão qual o pior caso de energia incidente. Deste modo, como primeiro passo do estudo, sugere-se analisar e classificar os compartimentos em tipos com características construtivas semelhantes, considerando os compartimentos de força, passíveis de intervenção em operação. A Figura 7.3 apresenta a vista frontal do PN-02, com a indicação dos tipos definidos.

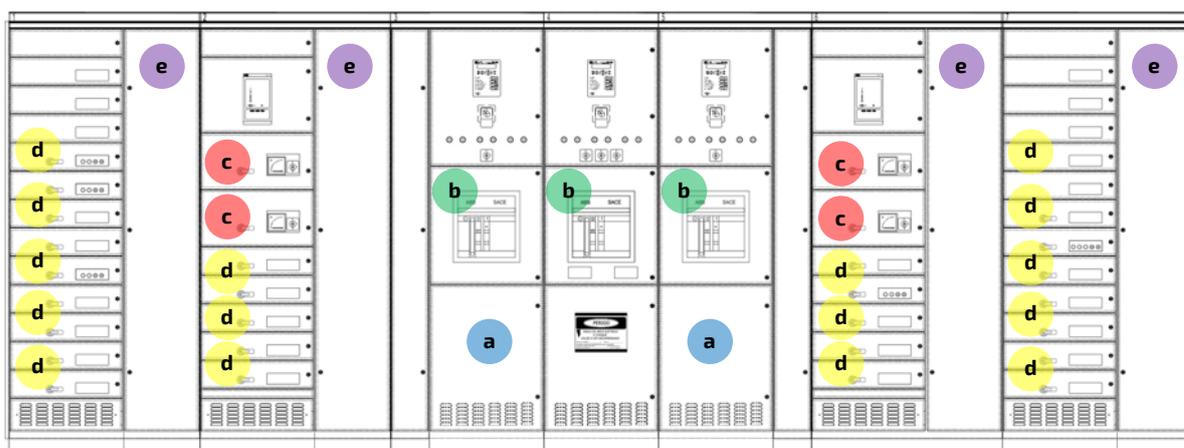


Figura 7.3 – PN-02: Determinação dos compartimentos a serem avaliados.

⁵¹ AFD: *Arc-Flash Detection* (dispositivo ou função de “detecção de arco”).

Onde:

- (a) Compartimento de cabos de entrada;
- (b) Compartimento de dispositivos (DJs), tipo CDC;
- (c) Compartimento de dispositivos (TPs), tipo CCM, altura aprox. 300 mm;
- (d) Compartimento de dispositivos (Demarradores), tipo CCM, altura aprox. 150 mm;
- (e) Compartimento de cabos de saída.

7.3.1.2 Determinação da configuração de eletrodo (E.C.)

Talvez o parâmetro mais subjetivo a ser determinado seja a configuração de eletrodo. As configurações definidas pela norma são básicas, e atribuí-las aos eletrodos de um sistema real pode requerer uma análise cuidadosa.

A Figura 7.4 apresenta detalhes do equipamento real relativos aos eletrodos de cada compartimento, e a configuração atribuída a cada um deles.



Figura 7.4 – PN-02: Determinação das configurações de eletrodo.

Nos compartimentos de cabos de entrada, os cabos entram no compartimento pela parte inferior, e se conectam às barras que sobem em direção aos disjuntores de entrada, passando pelos TCs. A configuração atribuída foi VCB.

Nos compartimentos de dispositivos, que contam com unidades extraíveis, é necessário estabelecer qual a condição do estudo. Quando os dispositivos estão inseridos, ou mesmo

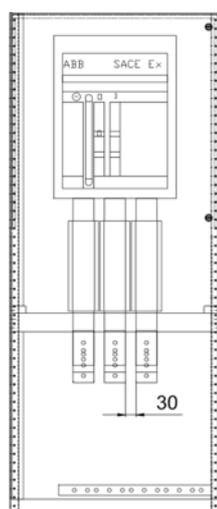
durante operação de extração/inserção, a presença do disjuntor ou da gaveta de comando serve como obstáculo à propagação da energia do arco elétrico. Estas situações, no entanto, não são previstas no modelo. Para este estudo, foi considerado o pior caso, que é a exposição direta ao arco, sem a presença da parte extraível. Em todos os compartimentos de dispositivos, a conexão das unidades extraíveis é feita através de eletrodos posicionados horizontalmente, sendo então adotada a configuração HCB.

Nos compartimentos de cabos de saída, não há segregação entre as unidades funcionais. Todas as saídas de uma mesma coluna são acessíveis pela mesma porta. Os cabos de saída se conectam a eletrodos horizontais. No entanto, os eletrodos estão orientados para a lateral do compartimento, uma configuração diferente da HCB, cujos eletrodos horizontais apontam diretamente para a abertura do compartimento. Ainda assim, por conservadorismo, foi escolhida a configuração HCB.

7.3.1.3 Determinação do espaçamento entre eletrodos (G)

O espaçamento entre eletrodos também é um parâmetro que requer análise cuidadosa para a sua determinação. Por necessidades construtivas, o espaçamento entre os condutores não é constante ao longo do conjunto de manobra, portanto é recomendado focar nos pontos mais prováveis de ocorrência de arco elétrico.

O parâmetro pode ser determinado pelos desenhos mecânicos, ou por medição direta, com o sistema desenergizado. Para este estudo, foram determinados os espaçamentos de 30 mm para as colunas de entrada e interligação (Figura 7.5), e de 36 mm para as demais colunas.



(a) pelo desenho



(b) por medição

Figura 7.5 – PN-02: Determinação do espaçamento entre eletrodos.

Ao contrário dos valores típicos sugeridos pela norma, indicados no Quadro 4.1, devido ao formato das garras dos demarradores, verificou-se um espaçamento maior nos compartimentos do tipo CCM, em comparação aos compartimentos do tipo CDC.

7.3.1.4 Determinação das dimensões do invólucro (*Height* × *Width* × *Depth*)

A determinação das dimensões do invólucro é uma tarefa relativamente simples, que pode ser realizada pelos desenhos mecânicos, ou por medição direta, conforme indicado na Figura 7.6.



Figura 7.6 – PN-02: Determinação das dimensões do invólucro.

O Quadro 7.1 apresenta as dimensões para cada compartimento do estudo.

Quadro 7.1 – PN-02: Dimensões dos invólucros.

Compartimento	H (mm)	W (mm)	D (mm)
Cabos de Entrada	770	550	400
DJ-02A/B/C	350	300	400
Gavetas – TPs	270	550	400
Gavetas – Demarradores	130	550	400
Cabos de Saída	2.100	390	400

Nos compartimentos dos disjuntores A/B/C extraíveis, as dimensões consideradas foram as dimensões de um subcompartimento, menor do que a abertura da porta, onde ficam instalados os disjuntores, pois é onde há probabilidade de ocorrência de arco.

Não há exigência de exatidão nas dimensões da profundidade, pois ela é utilizada apenas para a classificação de invólucro “raso” ou “típico”.

7.3.2 Dados elétricos e operacionais

7.3.2.1 Determinação da corrente de curto-circuito franca (I_{bf})

Neste estudo de caso, a corrente de curto-circuito franca foi obtida através da memória de cálculo do estudo de curto-circuito realizado pela empresa projetista da subestação, cujo valor presumido corresponde a **10,51 kA** na entrada do PN-02.

7.3.2.2 Determinação dos modos de operação

A determinação dos modos de operação do sistema é uma etapa importante para um estudo de energia incidente, pois alterações de topologia podem modificar tanto a corrente de curto-circuito do sistema, quanto a duração de arco, pois podem sensibilizar diferentes dispositivos de proteção.

O arranjo do PN-02 é do tipo secundário-seletivo, com alimentação oriunda de dois transformadores idênticos, onde cada transformador é dimensionado para suportar toda a carga da subestação, sendo admitidos os modos de operação conforme Figura 7.7.

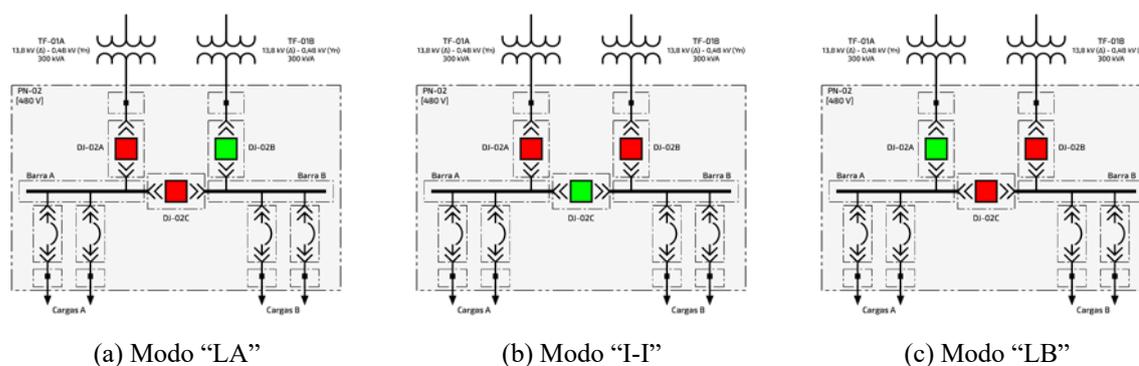


Figura 7.7 – PN-02: Determinação dos modos de operação.

Onde:

- (a) **Modo "LA"**: DJ-01A e DJ-01C fechados e DJ-01B aberto;
- (b) **Modo "I-I"**: DJ-01A e DJ-01B fechados e DJ-01C aberto (modo preferencial);
- (c) **Modo "LB"**: DJ-01B e DJ-01C fechados e DJ-01A aberto.

Não é admitida a operação contínua com os transformadores em paralelo, o que visa limitar a corrente de curto-circuito da barra. Somente é admitido o paralelismo momentâneo para a transferência de alimentadores.

7.3.2.3 Determinação dos cenários de falha

A definição dos cenários de falha consiste em estabelecer, para cada modo de operação (conforme 7.3.2.2), os possíveis locais de ocorrência de arco. A combinação desses elementos dá origem a um cenário, para o qual deve ser avaliada a atuação do esquema de proteção.

Genericamente, nos compartimentos que não possuem dispositivo de manobra (cabos e barras) apenas um ponto de falha pode ser considerado, enquanto nos compartimentos que possuem dispositivo de manobra (disjuntores e gavetas), pode-se considerar como situações distintas a ocorrência de arco em cada lado do dispositivo.

Uma vez definidos cada um dos cenários, verifica-se quais sensores de luz e corrente serão sensibilizados, quais relés operarão e qual o disjuntor será responsável por extinguir o arco. Para esta análise, é necessário consultar o diagrama funcional exibido na Figura 7.8 e conhecer a posição exata de instalação dos sensores no equipamento real.

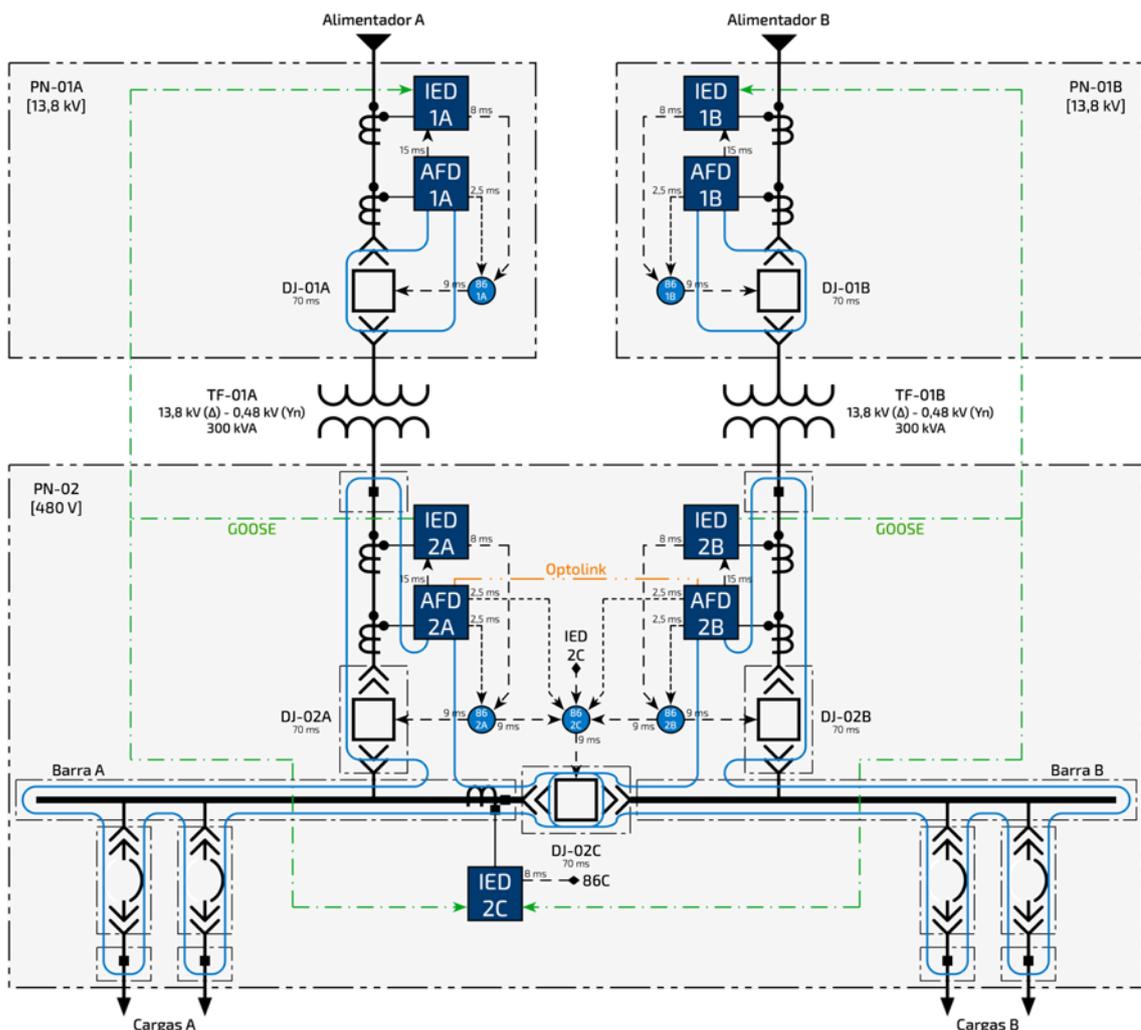


Figura 7.8 – PN-02: Diagrama unifilar com o esquema de proteção.

O PN-02 foi projetado para que a proteção contra arco elétrico seja realizada pelo esquema com relés de arco dedicados (AFD-2A e AFD-2B). Estes relés estão configurados para *trip* mediante pickup de luz e corrente. Cabe ressaltar que, nos relés de arco, o pickup de corrente se destina apenas à confirmação da ocorrência de arco de modo a evitar *trips* espúrios pela sensibilização indevida das fibras ópticas sem o concomitante aumento de corrente. *Trips* espúrios podem ocorrer pelo ajuste incorreto da sensibilidade do sensor de luz, fazendo com que o relé opere, por exemplo, com a luz ambiente da subestação.

Uma situação especial ocorre quando o sistema operar em modo “LA” ou “LB”. Caso um arco ocorra na “meia barra” oposta ao lado do transformador que está alimentando o sistema, o relé de arco que detectará a luz não será o mesmo que detectará a corrente. Para que haja atuação eficaz da proteção, os relés aplicados possuem ainda uma funcionalidade chamada de *Optolink*. Trata-se de uma conexão rápida (via fibra óptica de comunicação) entre os dois relés de arco que permite compartilhar eventos de pickup, da seguinte forma:

- Quando um relé detectar a luz, pode enviar sinal de pickup de luz via *Optolink* para outro relé de arco que está ligado ao TC que perceberá o aumento de corrente, dando condições para que ele opere; ou,
- Quando um relé detectar aumento de corrente, pode enviar sinal de pickup de corrente via *Optolink* para outro relé de arco que está ligado à fibra que perceberá a luz do arco, dando condições para que ele opere.

Enquanto num esquema de proteção convencional, baseado em corrente e tensão, o conceito de zona de proteção está relacionado ao local de instalação dos TCs e TPs, num esquema de proteção contra arco elétrico, além do local de instalação do TC responsável pela confirmação de corrente, este conceito também abrange o local físico de instalação dos sensores de luz. Esta não é uma informação que habitualmente consta nos diagramas unifilares e funcionais, podendo ser necessário realizar uma verificação de campo.

Apenas para fins de desenvolvimento da metodologia, considerando que os alimentadores A e B podem possuir diferentes níveis de curto-circuito, a combinação dos diferentes tipos de compartimentos, com o local de ocorrência do arco dentro dos mesmos e com os três modos de operação deram origem a 28 cenários.

O Quadro 7.2 apresenta os cenários de falha, indicando os sensores de luz e corrente que serão sensibilizados, os dispositivos de proteção que irão operar e o disjuntor responsável pela extinção do arco em cada cenário.

Quadro 7.2 – PN-02: Cenários de falha (completo).

#	Compartimento	Local do arco	Modo de operação	Sensor de luz	Sensor de corrente	Relés	Disjuntor	Obs
1	Cabos Entrada A	Qualquer	Qualquer	AFD-2A	IED-1A	IED-1A → 86-1A	DJ-01A	Sobrecorrente AT
2	Cabos Entrada B	Qualquer	Qualquer	AFD-2B	IED-1B	IED-1B → 86-1B	DJ-01B	Sobrecorrente AT
3	DJ-02A	Lado do alimentador	Qualquer	AFD-2A	AFD-2A	AFD-2A → IED-2A → IED-1A → 86-1A	DJ-01A	Via IEC 61850
4		Lado da barra	LA ou I I	AFD-2A	AFD-2A	AFD-2A → 86-2A	DJ-02A	
5		LB	AFD-2A	AFD-2B	AFD-2A → 86-2C	DJ-02C	Via <i>Optolink</i>	
6	DJ-02B	Lado do alimentador	Qualquer	AFD-2B	AFD-2B	AFD-2B → IED-2B → IED-1B → 86-1B	DJ-01B	Via IEC 61850
7		Lado da barra	LB ou I I	AFD-2B	AFD-2B	AFD-2B → 86-2B	DJ-02B	
8		LA	AFD-2B	AFD-2A	AFD-2B → 86-2C	DJ-02C	Via <i>Optolink</i>	
9	DJ-02C	Lado da barra A	LA ou I I	Ambos	AFD-2A	AFD-2A → 86-2A	DJ-02A	
10		LB	Ambos	AFD-2B	AFD-2A → 86-2C	DJ-02C		
11		Lado da barra B	LB ou I I	Ambos	AFD-2B	AFD-2B → 86-2B	DJ-02B	
12		LA	Ambos	AFD-2A	AFD-2B → 86-2C	DJ-02C		
13	Gaveta TPs A	Qualquer	LA ou I I	AFD-2A	AFD-2A	AFD-2A → 86-2A	DJ-02A	
14			LB	AFD-2A	AFD-2B	AFD-2A → 86-2C	DJ-02C	Via <i>Optolink</i>
15	Gaveta TPs B	Qualquer	LB ou I I	AFD-2B	AFD-2B	AFD-2B → 86-2B	DJ-02B	
16			LA	AFD-2B	AFD-2A	AFD-2B → 86-2C	DJ-02C	Via <i>Optolink</i>
17	Gaveta Cargas A	Lado da barra A	LA ou I I	AFD-2A	AFD-2A	AFD-2A → 86-2A	DJ-02A	
18			LB	AFD-2A	AFD-2B	AFD-2A → 86-2C	DJ-02C	Via <i>Optolink</i>
19			Lado da saída	LA ou I I	AFD-2A	AFD-2A	AFD-2A → 86-2A	DJ-02A
20		LB	AFD-2A	AFD-2B	AFD-2A → 86-2C	DJ-02C	Via <i>Optolink</i>	
21	Gaveta Cargas B	Lado da barra B	LB ou I I	AFD-2B	AFD-2B	AFD-2B → 86-2B	DJ-02B	
22			LA	AFD-2B	AFD-2A	AFD-2B → 86-2C	DJ-02C	Via <i>Optolink</i>
23			Lado da saída	LB ou I I	AFD-2B	AFD-2B	AFD-2B → 86-2B	DJ-02B
24		LA	AFD-2B	AFD-2A	AFD-2B → 86-2C	DJ-02C	Via <i>Optolink</i>	
25	Cabos Saída A	Qualquer	LA ou I I	AFD-2A	AFD-2A	AFD-2A → 86-2A	DJ-02A	
26			LB	AFD-2A	AFD-2B	AFD-2A → 86-2C	DJ-02C	Via <i>Optolink</i>
27	Cabos Saída B	Qualquer	LB ou I I	AFD-2B	AFD-2B	AFD-2B → 86-2B	DJ-02B	
28			LA	AFD-2B	AFD-2A	AFD-2B → 86-2C	DJ-02C	Via <i>Optolink</i>

A primeira observação importante é que, para os cenários 1 e 2, como o local do arco está à montante dos TCs, não há pickup de corrente pelos relés do PN-02, logo, sua proteção de arco não opera. Nesta situação, a operação da proteção se dá apenas pela função de sobrecorrente dos IEDs da alta tensão (PN-01A e PN-01B).

Nos cenários 3 e 6, nos compartimentos dos disjuntores de entrada, a corrente de arco pode ser detectada pois o compartimento está à jusante dos TCs, e o desligamento do disjuntor na alta tensão ocorre por um comando dos relés de arco para os IEDs da baixa tensão, e destes para os IEDs da alta tensão através de mensagem GOOSE⁵² via rede IEC 61850.

Também é importante ressaltar que em todos os cenários onde o arco ocorre na “meia barra” do lado oposto ao do transformador que está alimentando o sistema, o esquema de proteção só operará se o *Optolink* estiver ativo.

⁵² GOOSE: *Generic Object Oriented Substation Event* (Norma IEC 61850).

Apesar dos múltiplos cenários possíveis, algumas características como o mesmo nível de curto-circuito, mesma especificação, parâmetros e diagrama funcional para o lado A e B simplificam a análise prática para alguns poucos cenários, sumarizados no Quadro 7.3.

Quadro 7.3 – PN-02: Cenários de falha (para cálculo).

Cenário	Compartimento	$t_{\text{operação}}$ [ms]	$t_{\text{disjuntor}}$ [ms]	T_{arco} [ms]
a	Cabos de Entrada A/B	Calcular a corrente de arco e determinar o tempo de operação da proteção de sobrecorrente AT		A definir
b	DJ-02A/B	15+8+9	70	102
c	DJ-02C	2,5+9	70	81,5
d	Gavetas – TPs	2,5+9	70	81,5
e	Gaveta – Demarradores	2,5+9	70	81,5
f	Cabos de Saída A/B	2,5+9	70	81,5

A aplicação de relés de arco facilita o estudo de energia incidente pois seu tempo de operação é predeterminado, podendo ser conhecido antes mesmo do cálculo da corrente de arco.

Um fato que chama a atenção é o emprego de relés de bloqueio eletromecânicos em todos os circuitos de *trip*. O uso destes dispositivos adiciona atrasos na operação da proteção, que não podem ser negligenciados no estudo. Para facilitar a análise, na Figura 7.8 foram indicados os tempos de operação de cada dispositivo que está na linha de comando de *trip*. O tempo de atraso das mensagens GOOSE foi considerado desprezível.

Para o sistema estudado, com exceção dos compartimentos de cabos e de disjuntores de entrada, a ocorrência de arco em qualquer outro ponto do conjunto de manobra implicará no mesmo tempo de operação do sistema, independentemente do modo de operação. Assim, a energia incidente se diferenciará apenas pelas características construtivas dos compartimentos, e pela distância de trabalho considerada.

7.3.2.4 Determinação da distância de trabalho

A distância de trabalho, conforme discutido em 4.3.1.6, é a distância para a qual a energia incidente deve ser calculada.

A norma recomenda distâncias de trabalho diferentes para CDCs e CCMs, o que pode ser justificado tanto pelas características construtivas distintas de cada tipo de equipamento, quanto pelos serviços neles realizados. O PN-02 é um conjunto de manobra e comando do tipo “misto”, ou seja, as colunas de entrada e interligação são do tipo “CDC”, enquanto as colunas com os demarradores são do tipo “CCM”, conforme ilustrado na Figura 7.9.

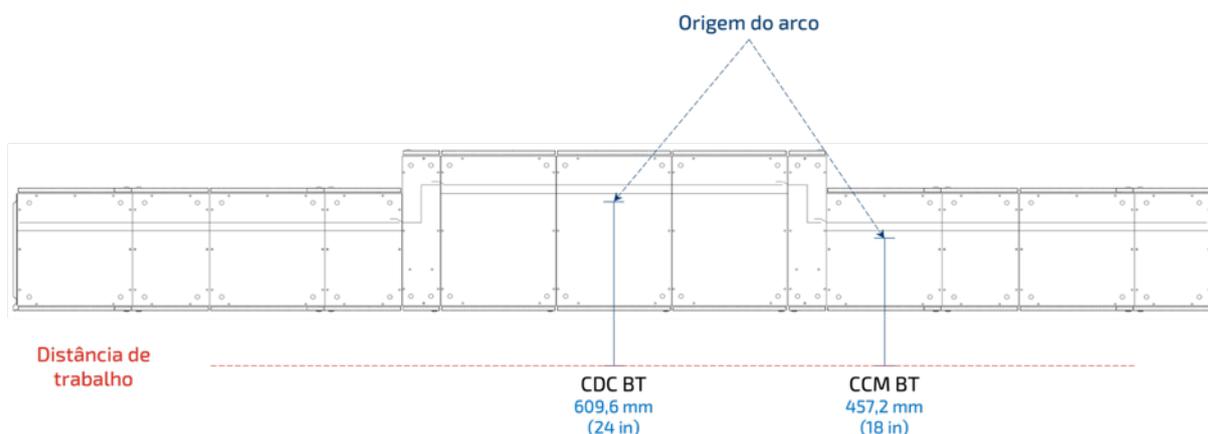


Figura 7.9 – PN-02: Determinação da distância de trabalho.

Para este estudo, foram adotadas distâncias de trabalho distintas, dependendo do compartimento avaliado:

- Colunas de entrada e interligação: 609,6 mm (típica de CDC de baixa tensão);
- Colunas de saída: 457,2 mm (típica de CCM de baixa tensão).

Dependendo do serviço a ser considerado, pode-se avaliar a energia incidente para outras distâncias de trabalho, ou mesmo realizar uma análise de sensibilidade para traçar a curva de energia pela distância, conforme discutido em 6.2.3.

7.4 Cálculos de energia incidente

7.4.1 Fluxograma de execução do script

O script possui duas etapas de cálculos. Após a inicialização, a primeira etapa vai até o cálculo de I_{arc} . Neste momento, há uma pausa na execução para avaliação das durações de arco. Quando os valores de T_{arc} forem inseridos e salvos na planilha, a segunda etapa pode ser iniciada, indo até o cálculo de E e AFB , conforme Figura 7.10.



Figura 7.10 – Fluxograma de execução do script para o Estudo de Caso 1.

7.4.2 Passo-a-passo

7.4.2.1 Passo 1: Preparar dados de entrada

Uma vez finalizado o levantamento de dados, a planilha com os dados de entrada foi preparada com os valores indicados na Figura 7.11.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1	Name	Config	Voc_kV	lbf_kA	Gap_mm	WkD_mm	H_mm	W_mm	D_mm
2	Cabos_Entrada	VCB	0,48	10,51	30	609,6	770	550	400
3	DJ-02AB	HCB	0,48	10,51	30	609,6	350	300	400
4	DJ-02C	HCB	0,48	10,51	30	609,6	350	300	400
5	Gaveta_TP	HCB	0,48	10,51	36	457,2	270	550	400
6	Gaveta_Dem	HCB	0,48	10,51	36	457,2	130	550	400
7	Cabos_Saida	HCB	0,48	10,51	36	457,2	2100	390	400

Figura 7.11 – PN-02: Dados de entrada.

7.4.2.2 Passo 2: Calcular I_{arc}

Após iniciado o script, as correntes de arco máximas e mínimas foram calculadas, e estão indicadas na Figura 7.12.

	A	B	C
1	Name	Config	larcmax_kA
2	Cabos_Entrada	VCB	7,886
3	DJ-02AB	HCB	7,510
4	DJ-02C	HCB	7,510
5	Gaveta_TP	HCB	7,320
6	Gaveta_Dem	HCB	7,320
7	Cabos_Saida	HCB	7,320

(a) I_{arcmax}

(b) I_{arcmin}

Figura 7.12 – PN-02: Correntes de arco.

7.4.2.3 Passo 3: Determinar durações de arco

Para os cenários onde há operação dos relés de arco, as durações de arco já puderam ser determinadas antes mesmo do cálculo das correntes de arco. Resta determinar as durações de arco do cenário que depende da proteção sobrecorrente (“Cabos_Entrada”).

O Quadro 7.4 apresenta as correntes de arco referidas ao primário dos transformadores, indicando que nos dois casos há sensibilização dos elementos de sobrecorrente (pickup de 225 A), que apresentam um atraso intencional de 700 ms (tempo definido), em função de critérios de seletividade cronológica aplicados. Deve-se adicionar também o tempo de operação do contato de *trip* dos IEDs, e o tempo de operação dos relés de bloqueio.

Quadro 7.4 – PN-02: Determinação da duração de arco para o cenário “a”.

Cenário	I_{arc} (BT) [A]	I_{arc} (AT) [A]	Proteção sensibilizada	Pickup [A]	$t_{operação}$ [ms]	$t_{disjuntor}$ [ms]	T_{arc} [ms]
I_{arcmax}	7.886	274,3	Sobrecorrente (50)	225	700+8+9	70	787
I_{arcmin}	6.914	240,5	Sobrecorrente (50)	225	700+8+9	70	787

As durações de arco foram então inseridas nas respectivas planilhas para o cálculo da energia incidente pelo script, conforme Figura 7.13.

	A	B	C	D		A	B	C	D
1	Name	Config	I_{arcmax_kA}	T_ms	1	Name	Config	I_{arcmin_kA}	T_ms
2	Cabos_Entrada	VCB	7,886	787	2	Cabos_Entrada	VCB	6,914	787
3	DJ-02AB	HCB	7,510	102	3	DJ-02AB	HCB	6,474	102
4	DJ-02C	HCB	7,510	81,5	4	DJ-02C	HCB	6,474	81,5
5	Gaveta_TP	HCB	7,320	81,5	5	Gaveta_TP	HCB	6,310	81,5
6	Gaveta_Dem	HCB	7,320	81,5	6	Gaveta_Dem	HCB	6,310	81,5
7	Cabos_Saida	HCB	7,320	81,5	7	Cabos_Saida	HCB	6,310	81,5

(a) $T_{I_{arcmax}}$ (b) $T_{I_{arcmin}}$

Figura 7.13 – PN-02: Durações de arco.

7.4.2.4 Passo 4: Calcular E e AFB

Após o preenchimento das durações de arco, executou-se o comando para o script calcular os valores de energia incidente e de limite de aproximação segura para cada compartimento, com o resultado (pior caso) indicado na Figura 7.14.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1	Name	Config	Voc_kV	WorstCase	I_{arc_kA}	T_{arc_ms}	E_Jcm2	E_calcm2	AFB_mm
2	Cabos_Entrada	VCB	0,48	IarcMax	7,886	787	34,9	8,3	2051
3	DJ-02AB	HCB	0,48	IarcMax	7,510	102	9,2	2,2	821
4	DJ-02C	HCB	0,48	IarcMax	7,510	81,5	7,3	1,8	735
5	Gaveta_TP	HCB	0,48	IarcMax	7,320	81,5	13,7	3,3	749
6	Gaveta_Dem	HCB	0,48	IarcMax	7,320	81,5	13,7	3,3	749
7	Cabos_Saida	HCB	0,48	IarcMax	7,320	81,5	12,7	3,0	723

Figura 7.14 – PN-02: Resultado final – Pior caso.

7.5 Análise dos resultados

O Quadro 7.5 apresenta os resultados de todos os cenários estudados conforme a IEEE Std 1584-2018, e também o resultado geral conforme a Edição de 2002, elaborado pela empresa projetista da subestação.

Quadro 7.5 – PN-02: Comparativo IEEE Std 1584-2002 vs. IEEE Std 1584-2018.

Cenário	Compartimento	IEEE Std 1584-2002	IEEE Std 1584-2018
a	Cabos Entrada A/B		$E = 8,3 \text{ cal/cm}^2$ $AFB = 2.051 \text{ mm}$
b	DJ-02A/B		$E = 2,2 \text{ cal/cm}^2$ $AFB = 820 \text{ mm}$
c	DJ-02C	$E = 1,5 \text{ cal/cm}^2$ $AFB = 520 \text{ mm}$	$E = 1,8 \text{ cal/cm}^2$ $AFB = 735 \text{ mm}$
d	Gavetas – TPs		$E = 3,3 \text{ cal/cm}^2$ $AFB = 749 \text{ mm}$
e	Gavetas – Demarradores		$E = 3,3 \text{ cal/cm}^2$ $AFB = 749 \text{ mm}$
f	Cabos Saida A/B		$E = 3,0 \text{ cal/cm}^2$ $AFB = 723 \text{ mm}$

Chama atenção o fato de que o estudo executado de acordo com a Edição de 2002, apresenta apenas um resultado para todo o conjunto de manobra e comando, enquanto o estudo pela Edição de 2018 apresenta resultados diferentes para os diversos compartimentos, o que é uma abordagem mais coerente, pois leva em consideração os aspectos construtivos que influenciam na maneira com que a energia térmica incide sobre um trabalhador exposto. Uma avaliação por compartimento contribui para evitar lacunas perigosas como a interpretação de que todos os compartimentos têm o mesmo risco. No sistema em questão, pode-se afirmar que o nível de energia incidente calculado pela Edição de 2002 não é válido para o compartimento de cabos de entrada, pois este não conta com a proteção de arco no seu modo normal de operação (luz e corrente).

Nota-se um acréscimo significativo de energia incidente dos compartimentos aos quais foi atribuída configuração de eletrodo horizontal. O modelo da Edição de 2002 foi estabelecido apenas com ensaios de eletrodos na posição vertical, subestimando a energia incidente de compartimentos com eletrodos posicionados horizontalmente, como visto neste estudo de caso.

O maior detalhamento dos resultados, por compartimento, não deve se traduzir em dificuldade para a gestão de segurança. As orientações para o pessoal de operação e manutenção devem ser simples. Para o sistema deste estudo de caso, por exemplo, uma vestimenta de proteção de uso diário com Classificação de Arco superior ao pior caso (**8,3 cal/cm²**) atenderia a uma intervenção neste equipamento (evidentemente, o conjunto deve ser complementado com outros EPIs, conforme análise de riscos). A título de comparação, pelo Método da Categoria de EPI (discutido em 3.4.3.3), que dispensa a realização de qualquer cálculo, o EPI recomendado para a intervenção neste conjunto de manobra e comando seria **Categoria 4**, conforme a tabela 130.7(C)(15)(a) da NFPA 70E-2021, apresentada no Anexo A.2.

7.6 Considerações finais

Este capítulo apresentou um estudo completo de energia incidente. Foi evidenciada a necessidade de um maior esforço de engenharia para realização do estudo, com relação à edição anterior da norma. Por outro lado, o novo método entrega resultados mais detalhados.

Cabe ainda o comentário que a migração de um estudo existente da edição 2002 para a 2018 não necessita, num primeiro momento, ser feito com todo o levantamento de dados aqui apresentado. Pode-se, inicialmente, utilizar os parâmetros típicos sugeridos pela norma, e revisar o estudo com dados reais à medida que estes puderem ser levantados.

8 DECREMENTO CA APLICADO AO ESTUDO DE ENERGIA INCIDENTE

8.1 Considerações iniciais

Alguns tipos de fontes fornecem uma corrente de curto-circuito simétrica eficaz que é máxima imediatamente após o início do evento, decaindo com o decorrer do tempo. Esta característica é conhecida como decremento CA.

Neste capítulo, será realizada uma breve revisão da literatura a respeito do decremento CA e das técnicas válidas para aplicar o método IEEE Std 1584-2018 considerando correntes variáveis.

8.2 Revisão da literatura

8.2.1 Tipos de fontes de curto-circuito e o seu decremento CA

Existem quatro tipos básicos de fontes de curto-circuito num sistema industrial [44]:

- **Geradores síncronos:** São as principais fontes de curto-circuito. Podem fornecer elevada contribuição, que sofre um decaimento após o início do curto-circuito, e atinge um nível de regime permanente uma vez que o gerador continua a ser movido por sua máquina primária (*e.g.* turbina, motor à combustão etc.) e continua a ser excitado por um sistema de excitação de campo independente;
- **Motores síncronos:** São máquinas similares aos geradores síncronos, mas que operam como motor. Durante um curto-circuito, o afundamento de tensão faz com que o motor perca potência e desacelere. Neste momento, a inércia da carga passa a impulsionar o motor, fazendo com que ele opere como gerador, fornecendo uma corrente de curto-circuito decrescente até a parada da máquina. Os motores síncronos geralmente contribuem com uma corrente de curto-circuito de menor amplitude em comparação aos motores de indução, porém por um período mais longo [43];
- **Motores de indução:** Assim como os motores síncronos, os motores de indução também perdem potência durante um curto-circuito devido ao afundamento de tensão e passam a ser impulsionados pela inércia do conjunto mecânico. A principal diferença está no fato de o motor de indução não possuir sistema de excitação. O campo no rotor é produzido pelo fluxo magnético induzido pelo estator. Durante um

curto-circuito, quando ocorre uma queda abrupta da tensão de alimentação, o fluxo induzido no rotor tende a zero, mas como não pode variar instantaneamente, irá gerar uma tensão no estator até cessar completamente em poucos ciclos;

- **Concessionária:** O sistema elétrico da concessionária é muito maior do que os sistemas elétricos industriais a ele interligados, e geralmente os seus geradores estão localizados a grandes distâncias do ponto de conexão. Um curto-circuito numa indústria praticamente não é sentido pelos geradores da concessionária. Contribuições de motores conectados ao sistema (externos à indústria em questão) são desprezadas. Por esse motivo, apesar de o sistema como um todo ser composto por máquinas rotativas, a contribuição de curto-circuito da concessionária é considerada constante para um estudo de curto-circuito industrial.

A Figura 8.1 apresenta as curvas de contribuição de curto-circuito simétrica típicas destes quatro tipos de fontes.

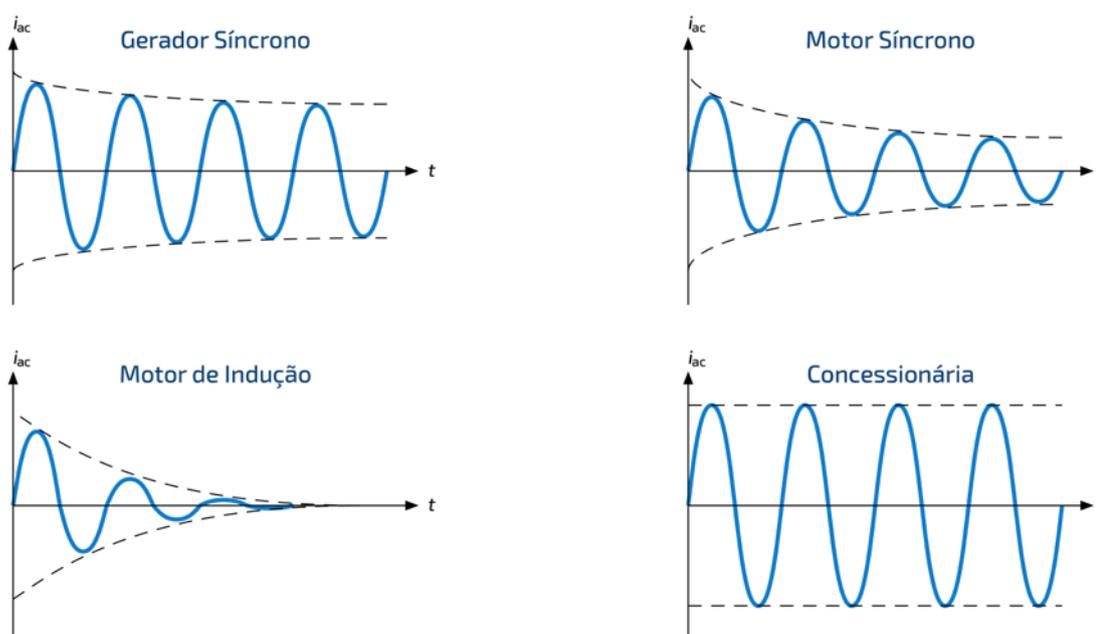


Figura 8.1 – Contribuições simétricas típicas de vários tipos de fontes – Adaptado de [30].

O decaimento nas contribuições simétricas de curto-circuito das máquinas rotativas, chamado de “decremento CA”, é menor nos geradores, moderado nos motores síncronos, e acentuado nos motores de indução. Esta característica ocorre em função do comportamento variável das reatâncias das máquinas rotativas durante o evento.

O modelo matemático para expressar o valor das reatâncias das máquinas rotativas em qualquer momento é complexo e dependente do tempo. Deste modo, em nome da simplicidade, se convencionou utilizar três valores de reatância aparente para os estudos de curto-circuito envolvendo máquinas rotativas [44]:

- **Reatância subtransitória (X_d''):** É o valor da reatância aparente no instante da ocorrência do curto-circuito, que determina o valor da corrente nos primeiros 5 ciclos;
- **Reatância transitória (X_d'):** É o valor da reatância aparente após o período subtransitório, e válido até aproximadamente 30 ciclos ou mais dependendo do projeto da máquina;
- **Reatância síncrona (X_d):** É o valor da reatância em regime permanente. Como só é válida 30 ou mais ciclos após a ocorrência do curto-circuito (acima de 500 ms), ela é geralmente aplicada em análises de desempenho de proteção com significativo atraso na operação (sobrecorrente temporizada).

8.2.2 Cálculo de energia incidente considerando o decremento CA

Apesar de ter desenvolvido um modelo matemático que considera como dado de entrada uma corrente de curto-circuito constante ao longo da duração de arco, a IEEE Std 1584-2018 alerta que as contribuições decrescentes devem ser consideradas.

Sistemas que contêm várias fontes de corrente de curto-circuito, como geradores, grandes motores ou conexão com mais de uma concessionária, podem ser mais adequadamente modelados por um método de simulação dinâmica. Os métodos podem incluir vários cálculos para contabilizar as contribuições de corrente de curto-circuito decrescentes de equipamentos rotativos, o seu efeito sobre os tempos de abertura dos dispositivos de proteção e a energia incidente resultante [1].

No entanto, a norma não apresenta diretrizes de como realizar esta simulação dinâmica. Este problema é abordado por Das [43], que discute três possibilidades de se realizar este estudo, ilustradas na Figura 8.2.

A primeira, conforme Figura 8.2 (a), desconsidera o decremento CA, calculando a energia incidente com todas as contribuições constantes (e máximas) até a interrupção da proteção. É a maneira mais simples de ser implementada, porém leva a resultados conservadores.

A segunda, conforme Figura 8.2 (b), considera contribuições constantes, mas reduz em degrau a contribuição do gerador a partir de certo momento, e limita a duração da contribuição dos motores. Uma das dificuldades desta técnica é a definição do momento de se aplicar o degrau nas contribuições, que é cercada de incertezas.

A terceira, conforme Figura 8.2 (c), mostra uma visão conceitualmente mais coerente, considerando a teoria do decremento CA das máquinas rotativas.

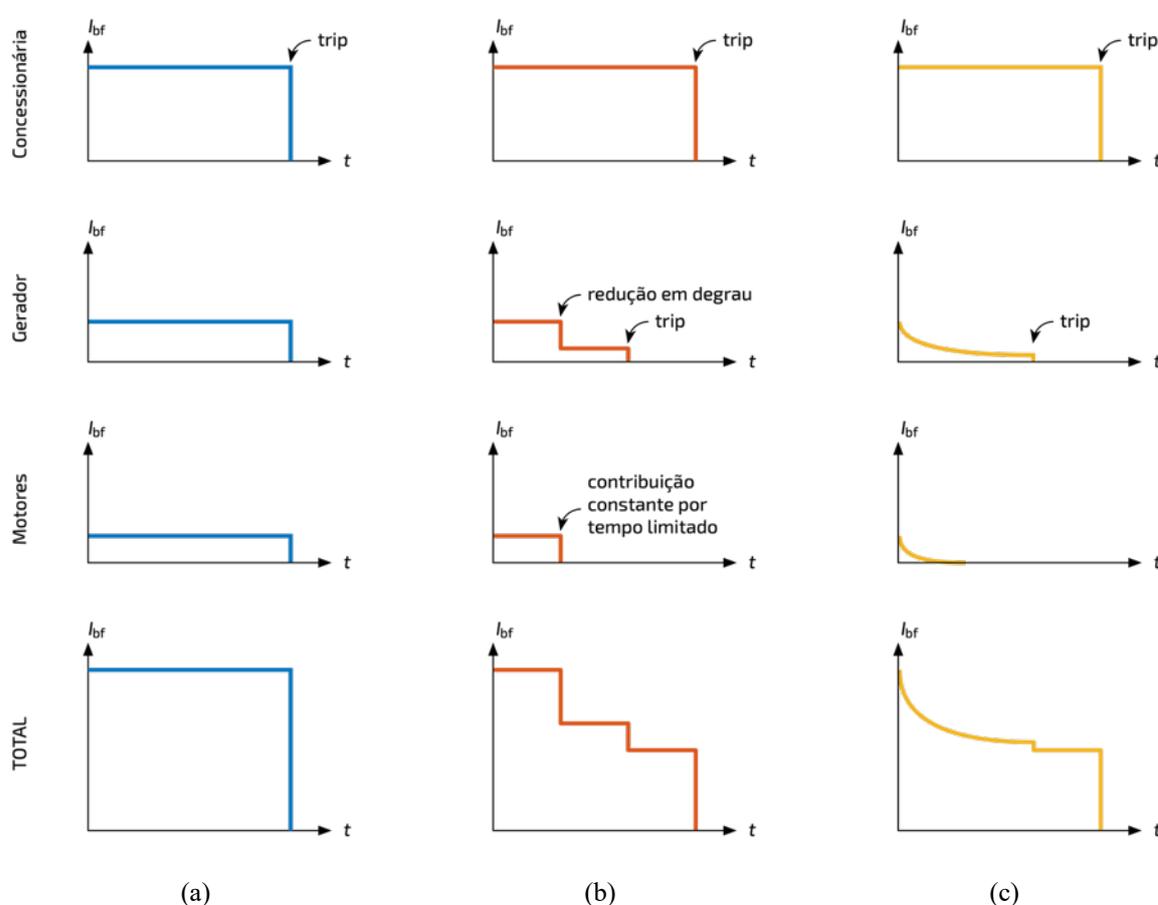


Figura 8.2 – Perfis das contribuições de curto-circuito totais – Adaptado de [43].

Considerando que a energia incidente (E) é de alguma forma proporcional à área sob a curva “TOTAL”, pode-se admitir que $E_{(a)} > E_{(b)} > E_{(c)}$, sendo o caso (c) o mais próximo do real. Cabe ressaltar que, nestes exemplos, o momento do *trip* do gerador foi aparentemente o mesmo para os três casos, ou seja, a redução de corrente introduzida nos exemplos (b) e (c) não afetou o tempo de operação da proteção, agindo como uma proteção de tempo definido. Como já visto, isto nem sempre é verdade, em função das proteções de sobrecorrente com curva do tipo tempo inverso.

Alguns softwares comerciais, como o módulo *Arc Flash* do SKM Power*Tools (PTW), oferecem a possibilidade de implementar a estratégia conforme Figura 8.2 (b). A Figura 8.3 apresenta a tela de opções do aplicativo, onde é possível configurar o valor da contribuição reduzida (em % da corrente nominal) e o momento de aplicar o degrau (em ciclos) para geradores e motores síncronos, e a duração (em ciclos) da contribuição de motores de indução.

Não se tem conhecimento de software comercial que calcule a energia incidente conforme Figura 8.2 (c) [43].

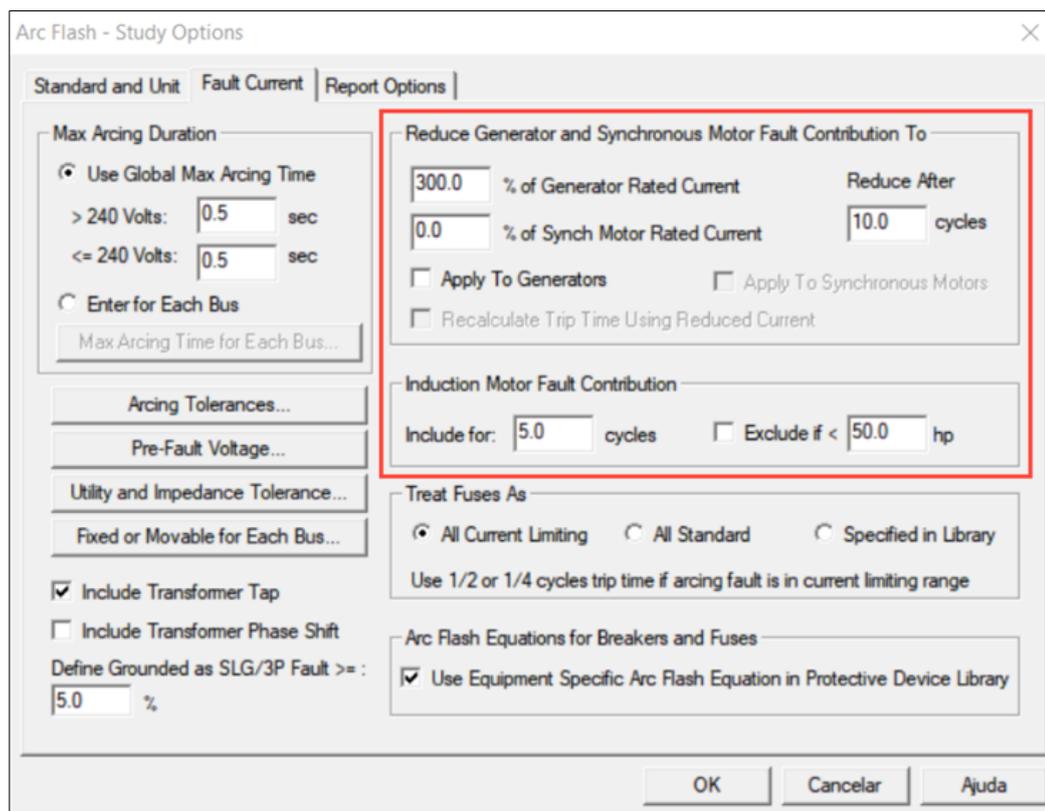


Figura 8.3 – Tela de opções do módulo *Arc Flash* do PTW.

Para o cálculo de energia incidente considerando o decremento CA, Das [43] propõe um algoritmo constituído das etapas:

- i. Traçar as curvas de contribuição (com decremento CA) das máquinas rotativas;
- ii. Ajustar o gráfico para indicar o tempo de operação das proteções;
- iii. Dividir o gráfico em segmentos de tempo apropriados;
- iv. Estimar a corrente média em cada segmento;
- v. Calcular a energia incidente em cada segmento com a corrente média;
- vi. Somar a energia de todos os segmentos.

Segundo Das [43], a escolha da duração de cada segmento é arbitrária, entretanto, é recomendado que os segmentos sejam menores quando o decaimento das contribuições for mais acentuado.

O autor apresenta como exemplo um sistema onde há contribuições da concessionária, de um gerador síncrono e de motores de indução, ilustrado na Figura 8.4.

Para este exemplo, o autor sugeriu dividir a análise nos seguintes segmentos:

- 0,001 – 0,010 s;
- 0,010 – 0,100 s;
- 0,100 – 0,500 s (no exemplo, a duração do arco era exatamente 500 ms).

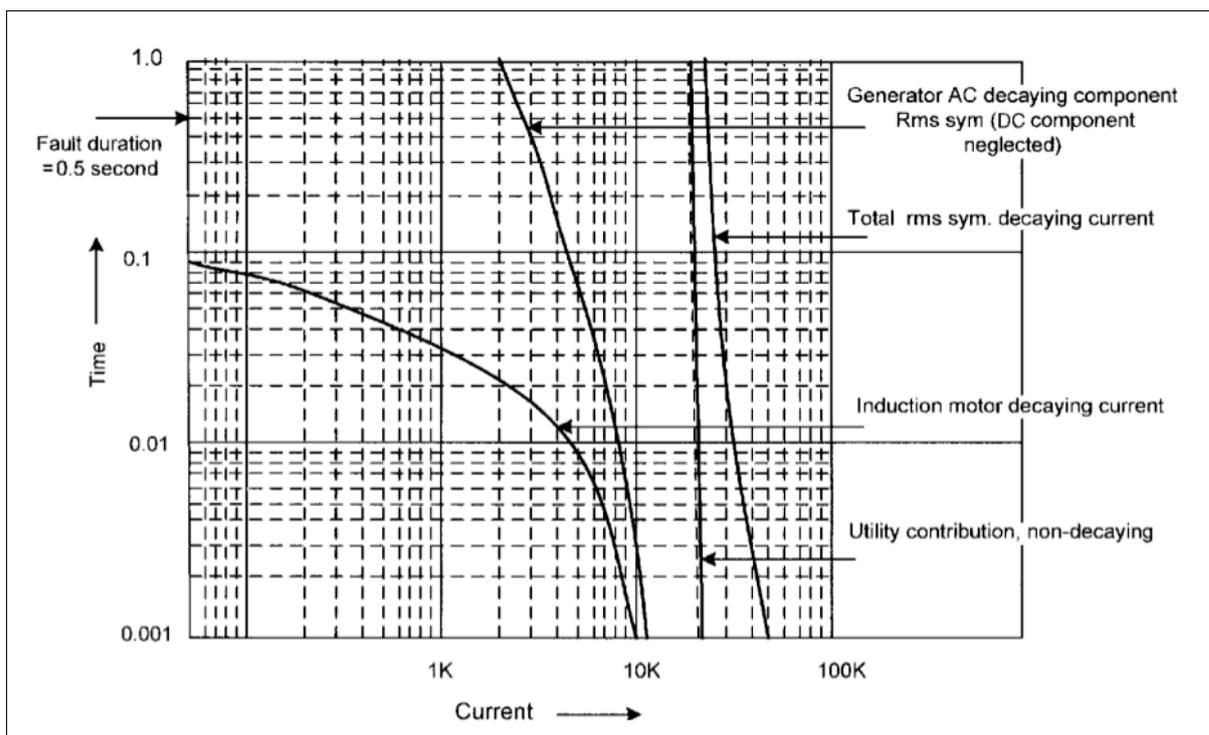


Figura 8.4 – Exemplo proposto por Das [43].

O exemplo apresentado, no entanto, é extremamente simples, pois é considerado o mesmo tempo de atuação da proteção para todas as contribuições. A realidade pode ser bem mais complexa, com contribuições cessando em tempos diferentes, devido às variações da corrente de arco interagindo com proteções do tipo tempo inverso, dando origem a uma corrente de curto-circuito total descontínua, como será apresentado no estudo de caso.

Das [43] não discute em detalhes a aplicação do método proposto, tampouco apresenta os cálculos do seu exemplo numérico. Segundo o autor, na época da publicação da referida edição, em janeiro de 2021, não havia trabalhos publicados sobre este tema.

8.3 Aplicabilidade de técnicas de análise de circuitos

A IEEE Std 1584-2018 não esclarece qual método de simulação dinâmica é aplicável para o cálculo da energia incidente em sistemas com múltiplas fontes ou com correntes variáveis. Deste modo, faz-se necessário avaliar a aplicabilidade e a exatidão de algumas técnicas para a solução destes sistemas.

8.3.1 Segmentação da corrente de falta franca

A primeira análise sugerida é a verificação matemática da validade da soma da energia incidente calculada para segmentos de uma corrente de falta franca constante.

A Figura 8.5 apresenta no caso (a) uma corrente de falta franca de 20 kA, com uma duração de arco de 500 ms. Os outros casos apresentam a mesma corrente segmentada em (b) 2 intervalos de 250 ms, (c) 5 intervalos de 100 ms e (d) 20 intervalos de 25 ms.

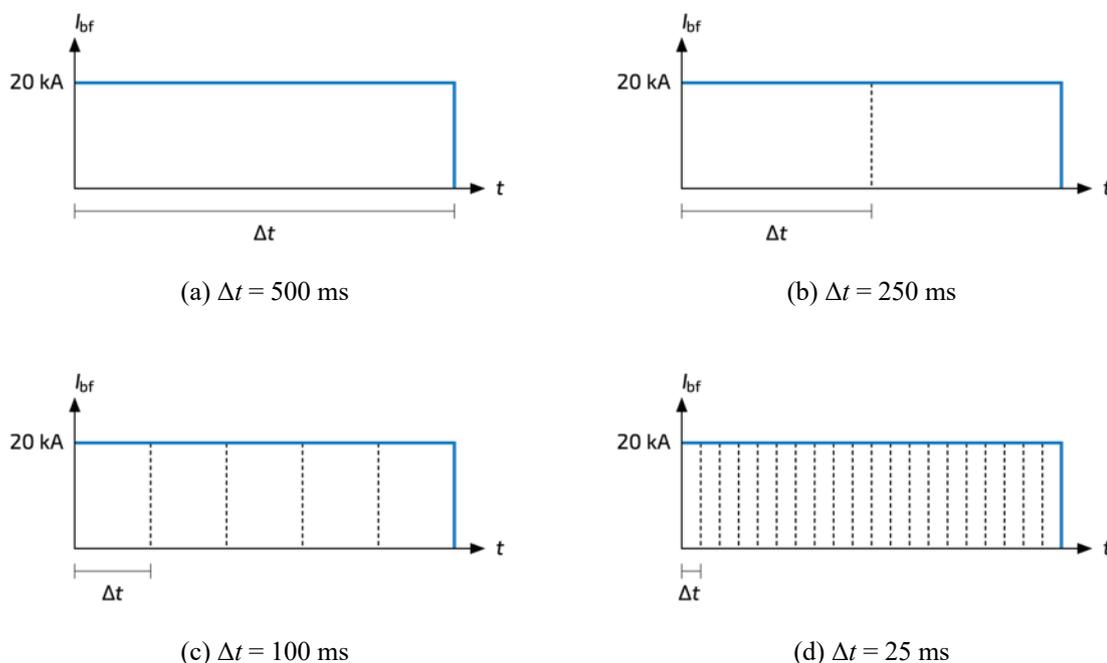


Figura 8.5 – Análise da segmentação de uma corrente constante.

A energia incidente total (E_{tot}) foi calculada como a soma da energia incidente dos segmentos ($E_{\Delta t}$). Foram utilizados parâmetros arbitrários (13,8 kV, VCBB, invólucro 1143 × 762 × 762 mm, $G = 152$ mm, $D = 914,1$ mm). O Quadro 8.1 mostra os resultados.

Quadro 8.1 – Análise da segmentação de uma corrente constante.

Cenário	(a) $\Delta t = 500$ ms	(b) $\Delta t = 250$ ms	(c) $\Delta t = 100$ ms	(d) $\Delta t = 25$ ms
Energia Incidente	$E_{\Delta t} = 19,4$ cal/cm ² $E_{tot} = \mathbf{19,4}$ cal/cm ²	$E_{\Delta t} = 9,69$ cal/cm ² $E_{tot} = \mathbf{19,4}$ cal/cm ²	$E_{\Delta t} = 3,87$ cal/cm ² $E_{tot} = \mathbf{19,4}$ cal/cm ²	$E_{\Delta t} = 0,97$ cal/cm ² $E_{tot} = \mathbf{19,4}$ cal/cm ²
Limite de Aproximação Segura	$AFB_{\Delta t} = 4.792$ mm $AFB_{tot} = \mathbf{4.792}$ mm	$AFB_{\Delta t} = 3.171$ mm $AFB_{tot} = \mathbf{6.342}$ mm	$AFB_{\Delta t} = 1.838$ mm $AFB_{tot} = \mathbf{9.188}$ mm	$AFB_{\Delta t} = 805$ mm $AFB_{tot} = \mathbf{16.096}$ mm

Considerando o caso (a) como o valor correto, pode-se verificar que nos demais casos se obteve o mesmo valor de energia incidente, confirmando a validade desta técnica, que é coerente com a já discutida relação linear entre a duração de arco e a energia incidente.

Entretanto, verifica-se que a técnica não é válida para o cálculo do limite de aproximação segura. A relação não linear entre a energia incidente e a distância faz com que sejam introduzidos erros, que aumentam com a quantidade de segmentos utilizados.

8.3.2 Valor médio de uma corrente variável

A energia incidente (E) de arco elétrico não é calculada diretamente a partir da corrente de falta franca (I_{bf}), que é um dado de entrada do modelo matemático, mas a partir da corrente de arco (I_{arc}), que é um dado calculado, além de outros parâmetros.

Os dados dos ensaios realizados pelo grupo de trabalho da IEEE Std 1584-2018 demonstraram que a relação entre a corrente de arco (I_{arc}) e a corrente de falta franca (I_{bf}) não pode ser considerada linear devido às variações de impedância do sistema. A Figura 8.6 apresenta a relação I_{arc}/I_{bf} para diferentes valores de I_{bf} , em que se pode verificar que a relação I_{arc}/I_{bf} diminui à medida que aumenta o valor de I_{bf} .

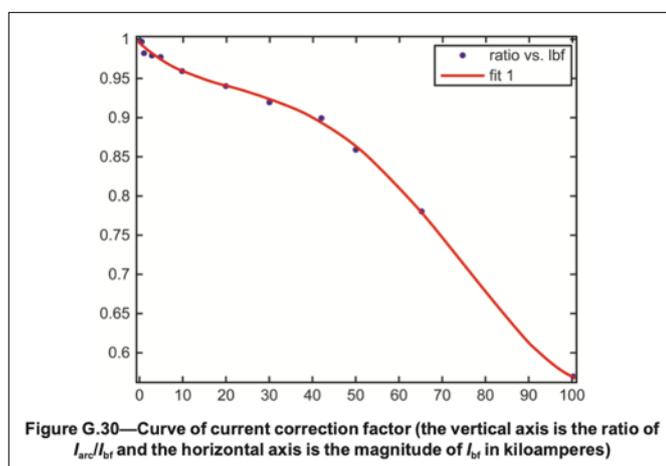


Figura 8.6 – Relação I_{arc}/I_{bf} para diferentes valores de I_{bf} [1].

A Figura 8.7 apresenta a corrente de arco em função da variação da corrente de falta franca calculada para conjuntos de manobra e comando de 13.800, 4.160 e 480 V, com o eixo das abscissas em ordem invertida (decrecente). A área azul representa a faixa de valores entre a corrente de arco máxima (plena) e mínima (reduzida) para cada nível de tensão. Nestas simulações, foi considerada a configuração VCBB e as dimensões típicas sugeridas pela norma.

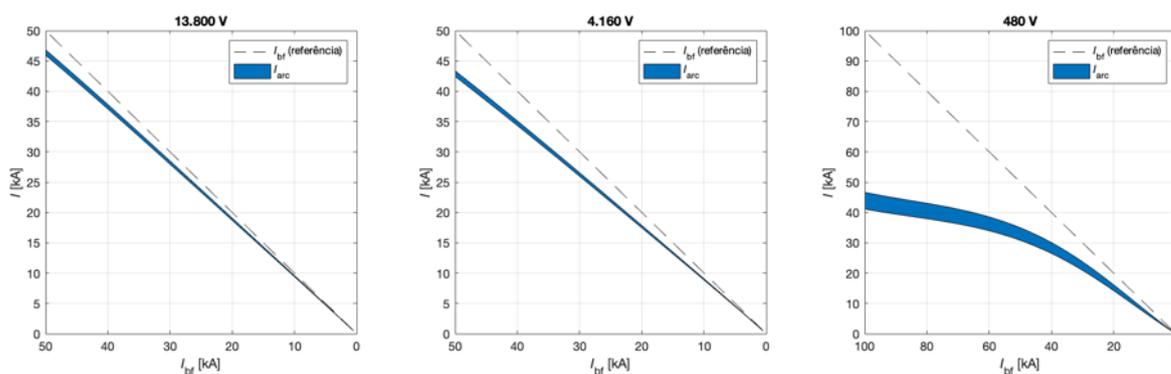


Figura 8.7 – I_{arc} em função de I_{bf} , para tensões de 13.800, 4.160 e 480 V.

Uma implicação desta relação não linear entre a corrente de falta franca e a corrente de arco é que a energia incidente resultante de um sistema em que a corrente de falta franca é continuamente decrescente não pode ser calculada com exatidão a partir do valor médio desta corrente. A título de exemplo, foi avaliada uma corrente de curto-circuito com decaimento, discretizada em segmentos de curta duração (0,1 ms), de modo a se aproximar do perfil contínuo da corrente real, indicada na Figura 8.8. Na mesma figura também é apresentado o gráfico com a corrente média equivalente, calculada a partir da integral da corrente com decaimento, dividida pela duração total do evento (6 ciclos).

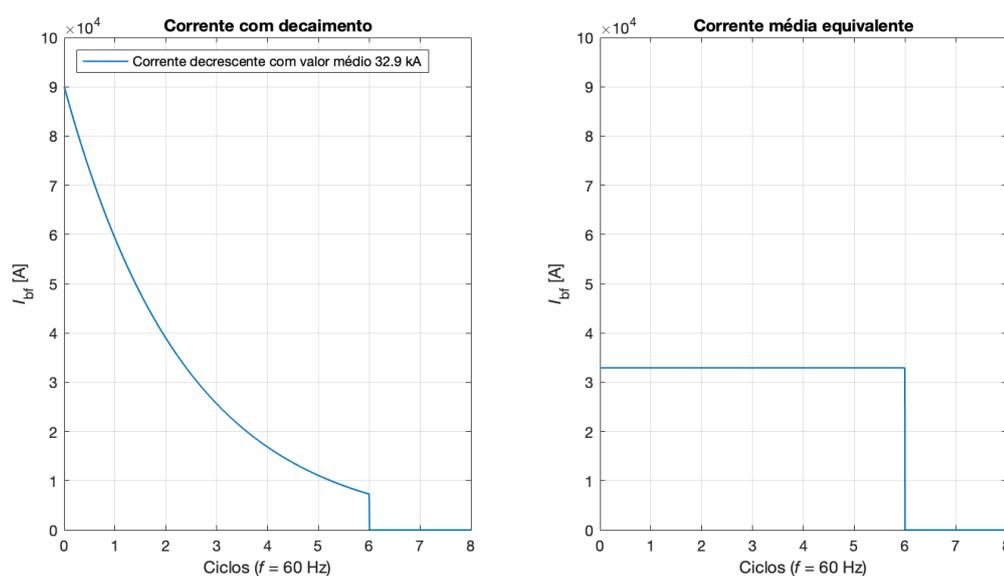


Figura 8.8 – Corrente com decaimento e Corrente média equivalente.

A energia incidente calculada pela soma das parcelas de energia incidente de cada segmento da corrente com decaimento é **4,54** cal/cm², enquanto a energia incidente calculada pela corrente média equivalente é **5,16** cal/cm². Em ambos os casos foram utilizados parâmetros arbitrários (480 V, VCBB, invólucro 508 × 508 × 508 mm, $G = 32$ mm, $D = 609,6$ mm).

8.3.3 Superposição de fontes

Um princípio aplicado na solução de circuitos elétricos com múltiplas fontes é o Teorema da Superposição, pelo qual pode-se afirmar que a corrente elétrica total em um certo ramo do circuito é igual a soma das contribuições individuais de cada fonte. Este teorema advém da propriedade aditiva das funções lineares. No entanto, a relação não linear entre a corrente de arco (I_{arc}) e a corrente de falta franca (I_{bf}), *a priori*, invalida a aplicação do método da superposição para o cálculo de energia incidente de um sistema com múltiplas fontes.

Para ilustrar esta constatação com um exemplo numérico, a Figura 8.9 apresenta um sistema arbitrário (480 V, VCB, invólucro 508 × 508 × 508 mm, $G = 32$ mm, $D = 609,6$ mm, $T_{arc} = 200$ ms), com duas fontes que contribuem com correntes de curto-circuito $I_{bf1} = 20$ kA e $I_{bf2} = 80$ kA, ambas consideradas constantes.

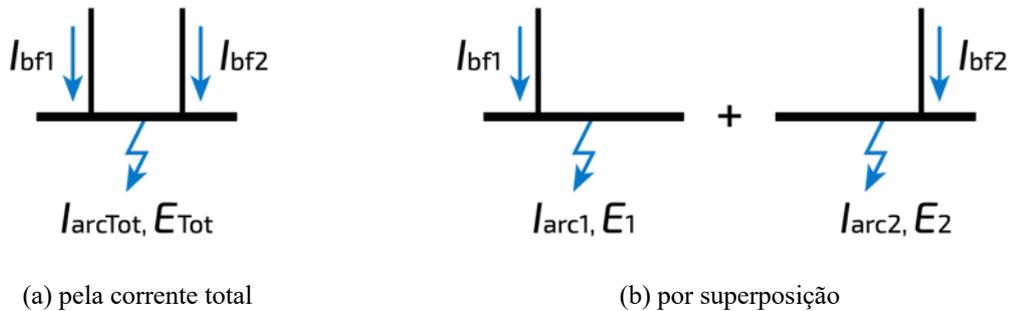


Figura 8.9 – Comparação entre a resolução pela corrente total e por superposição.

O Quadro 8.2 apresenta os cálculos da resolução pela corrente total (a), e pelo método da superposição (b).

Quadro 8.2 – Comparação entre a resolução pela corrente total e por superposição.

	(a) pela corrente total	(b) por superposição
1ª etapa	Calcular a corrente de arco e a energia incidente total a partir da corrente de falta franca total: $I_{bf} \rightarrow I_{arc} \rightarrow E$ tot: 100 kA → 46,7 kA → 19,7 cal/cm ²	Calcular as correntes de arco e energia incidente das fontes separadamente: $I_{bf} \rightarrow I_{arc} \rightarrow E$ 1: 20 kA → 16,1 kA → 6,1 cal/cm ² 2: 80 kA → 43,0 kA → 18,1 cal/cm ²
2ª etapa	Calcular as contribuições de I_{arc} proporcionais às contribuições de I_{bf} : $\%I_{bfTot} \rightarrow \%I_{arcTot} \rightarrow I_{arc}$ 1: 20% → 20% → 9,3 kA 2: 80% → 80% → 37,4 kA	Calcular a energia incidente total pela soma das energias parciais: $E_{tot} = E_1 + E_2 = 24,2$ cal/cm ²

A aplicação do método da superposição leva a valores incorretos tanto da energia incidente, quanto das contribuições de corrente de arco, que representam as correntes que passam pelos dispositivos de proteção durante o evento. O erro é maior, principalmente, nos sistemas de baixa tensão e com alto valor de corrente de falta franca, numa faixa de maior não-linearidade entre I_{bf} e I_{arc} , conforme indicado na Figura 8.7.

8.4 Considerações finais

Este capítulo fez uma síntese sobre o decremento CA, e discutiu a forma de considerá-lo num estudo de energia incidente. Também avaliou a aplicabilidade de algumas técnicas de análise de circuitos ao cálculo de energia incidente. Em suma:

- A segmentação (no tempo) de uma corrente de falta franca é válida para o cálculo de energia incidente;
- O cálculo da energia incidente pelo valor médio de uma corrente variável introduz erro que aumenta na medida que aumenta a variação da corrente no segmento. Esta técnica pode ser utilizada com a adequada escolha dos segmentos em que ela será aplicada, visando minimizar o erro;
- A superposição de fontes introduz erro no cálculo de energia incidente, da mesma maneira que o cálculo pelo valor médio da corrente, em função da relação não linear entre a corrente de falta franca e a corrente de arco. Não é possível minimizar o erro inserido por esta técnica, portanto ela não deve ser aplicada;
- Nenhuma das técnicas discutidas é válida para o cálculo do limite de aproximação segura.

Estas conclusões serão utilizadas no desenvolvimento da metodologia aplicada no próximo estudo de caso.

9 ESTUDO DE CASO 2 – DECREMENTO CA

9.1 Considerações iniciais

O presente capítulo apresenta um segundo estudo de caso, propondo um roteiro de “simulação dinâmica”, conforme definido pela IEEE Std 1584-2018, para o cálculo de energia incidente considerando o decremento CA.

9.2 Apresentação do sistema

O sistema escolhido para o estudo de caso é uma subestação industrial de uma Unidade de Craqueamento Catalítico Fluido de Resíduo (URFCC) de uma refinaria de petróleo.

Iniciando pela entrada de energia, relaciona-se os seguintes equipamentos, cujos dados relevantes para o estudo constam no diagrama unifilar do Anexo C.1:

- Alimentação da concessionária (REDE 69KV) e subestação de entrada, em 69 kV;
- Transformadores de entrada (TF-01A/B), de 69 para 13,8 kV;
- Gerador síncrono da “Barra A” (TURBO-EXPANSOR) de 32,5 MVA;
- Gerador síncrono da “Barra B” (TURBINA-GAS) de 33,9 MVA;
- Painéis de distribuição geral (PN-01A/B), em 13,8 kV.

Os painéis PN-01A/B distribuem energia elétrica para toda a refinaria, que conta com mais de quarenta subestações, omitidas neste estudo. A subestação de processo sob estudo, conta com os seguintes subsistemas:

- Painéis de distribuição local (PN-02A/B), em 13,8 kV;
- Transformadores da unidade de processo (TF-02A/B, TF-03A/B e TF-04A/B), da tensão de distribuição (13,8 kV) para as tensões de utilização (4,16 e 0,48 kV);
- CDCs de média tensão (PN-03A/B), em 4,16 kV;
- CDCs de baixa tensão (PN-04A/B e PN-05A/B), em 480 V.

A subestação de processo alimenta diversos motores elétricos, todos assíncronos, com tensões nominais de 4.000 e 440 V. Para simplificação, os motores de pequeno porte (oriundos de CCMs) foram agrupados. O sistema de proteção não conta com relés de arco, toda a proteção é baseada em relés digitais “convencionais”, com sensores de corrente apenas. Os sistemas auxiliares, não relevantes para o estudo, foram convenientemente omitidos.

9.3 Levantamento de dados

9.3.1 Dados gerais

Para a realização de um estudo “dinâmico” de energia incidente, deve-se iniciar com o levantamento dos mesmos dados necessários para a realização de um estudo “convencional”, conforme exemplificado no item 7.3.

Entretanto, em função da inviabilidade de desenergização da subestação escolhida durante o período de realização deste estudo, e conseqüente impossibilidade de se realizar uma inspeção interna para o levantamento das características reais dos compartimentos, o estudo de energia incidente foi executado considerando um compartimento típico de cada conjunto de manobra e comando, com os seguintes parâmetros:

- Configuração de eletrodo VCBB (Figura 4.4);
- Espaçamento entre eletrodos típico (Quadro 4.1);
- Dimensões de invólucro típicas (Quadro 4.2);
- Distância de trabalho típica (Quadro 4.3).

Como o objetivo principal deste estudo de caso é consolidar o método, o ajuste quantitativo do resultado de energia incidente pode ser feito tempestivamente, dependendo de oportunidade de acesso à instalação desenergizada para levantamento das características construtivas.

Para a determinação das correntes de curto-circuito simétricas iniciais, o sistema foi modelado no SKM Power*Tools (PTW), e as correntes calculadas pela metodologia ANSI/IEEE. O resultado do estudo se encontra no Anexo C.2.

Em uma refinaria de petróleo sempre há equipamentos desligados, seja pelo fato de um processo não estar sendo realizado no momento, seja pelo fato de haver redundância de equipamentos (*e.g.* bombas redundantes podem ser ambas acionadas por motores elétricos “A” e “B”, ou uma ser acionada por motor elétrico e outra por turbina). O estudo de curto-circuito procurou representar esta situação, deixando alguns motores fora de serviço, com o intuito de computar apenas as contribuições de curto-circuito de uma operação normal.

O estudo base foi realizado com a configuração “I-I”, *i.e.*, com os disjuntores de interligação abertos.

9.3.2 Dados específicos para o estudo dinâmico

9.3.2.1 Premissas adotadas

Um sistema elétrico industrial pode ser composto por diversas subestações. A rigor, os decaimentos de corrente se propagam através dos transformadores, contudo, sabe-se que as impedâncias destes transformadores têm efeito atenuador ou limitador para as correntes de curto-circuito. Além disso, computar individualmente os decrementos CA de contribuições de curto-circuito de máquinas conectadas em barras diversas da barra em estudo pode se tornar uma tarefa extenuante ou impraticável. Portanto, foram estabelecidos alguns critérios para simplificar ou mesmo viabilizar o estudo de caso:

- Foram considerados os decrementos CA das contribuições dos geradores apenas nas barras diretamente conectadas aos mesmos, incluindo barras adjacentes conectadas por cabos (mesmo nível de tensão);
- Foram considerados os decrementos CA das contribuições dos motores nas barras que alimentam os respectivos motores, e nas barras imediatamente à montante destas, mesmo que separadas por transformador.

Outra definição necessária para o estudo dinâmico é o tamanho do passo de simulação, *i.e.*, a duração dos segmentos da corrente de falta franca discretizada. Diferentemente do estudo “convencional”, em que cada linha da planilha de dados corresponde a um caso completo, no estudo “dinâmico” cada linha corresponderá a um passo de simulação. Como a segmentação no tempo é válida independentemente do tamanho dos segmentos, um leque de opções se abre. A Figura 9.1 ilustra duas situações possíveis, com segmentos menores (a) ou maiores (b).

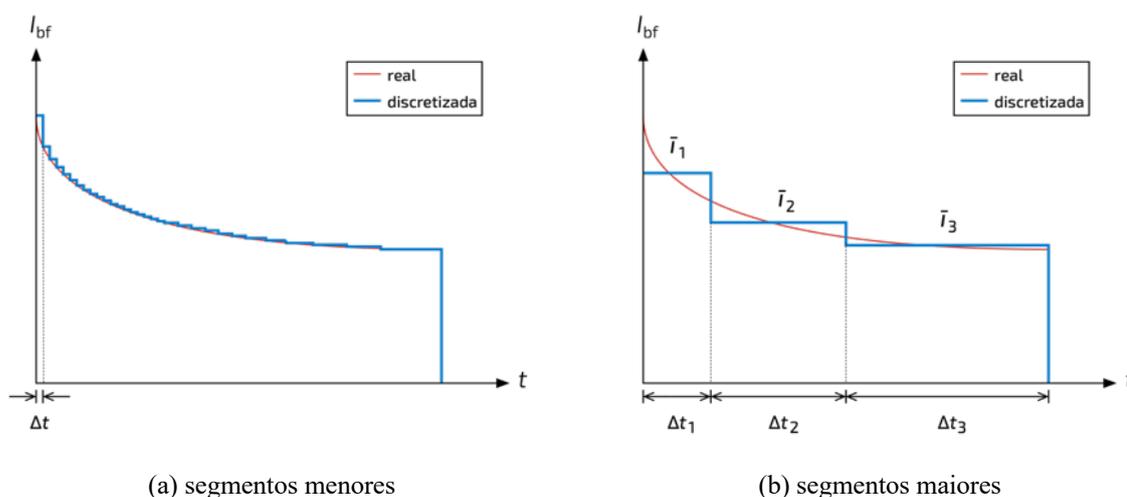


Figura 9.1 – Opções de escolha do passo de simulação.

A escolha do tamanho deste passo deve levar em consideração que:

- Quanto menor o passo (Δt):
 - A curva discretizada se aproxima da curva real;
 - A curva discretizada se adapta mais facilmente a perfis “recortados” da curva real. Esses degraus podem ocorrer em função das atuações, em tempos distintos, das proteções das contribuições;
 - Se o passo for suficientemente pequeno, pode-se considerar a corrente constante no segmento, sem a necessidade de cálculo da corrente média;
 - Mais cálculos precisam ser processados.
- Quanto maior o passo (Δt):
 - É necessário calcular a corrente média (\bar{I}) em cada segmento;
 - Pode haver erro na determinação do tempo de operação da proteção, caso esta seja baseada em relés de sobrecorrente com curva do tipo de tempo inverso, pois esta avaliação será feita pela corrente de arco média no segmento;
 - Pode ser necessário reajustar o tamanho dos segmentos de análise para etapa do cálculo da energia incidente, se houver algum degrau na curva da corrente de falta franca total no meio de algum segmento;
 - Menos cálculos precisam ser processados.

Pode-se concluir que, quanto maior o tamanho do passo de simulação, maior deve ser o cuidado que o responsável pelo estudo deve ter para evitar o acúmulo de erros de estimação. Cabe frisar que o tamanho dos segmentos não precisa ser uniforme, ele pode variar de acordo com a conveniência da análise.

Em função da alta capacidade de processamento dos computadores pessoais atuais, e da facilidade de manipulação dos dados com o script, sugere-se utilizar segmentos de pequena duração, como **1 ms**, que é uma base de tempo conveniente para se trabalhar com a operação dos dispositivos do sistema de proteção.

A princípio, as curvas devem ser estendidas até um tempo presumidamente suficiente para comportar a atuação do sistema de proteção e a extinção do arco. Cabe ressaltar que há uma prática convencional de se limitar a duração de arco em 2 s, salvo exceções discutidas no item 4.3.2.3. Neste estudo, as curvas foram didaticamente estendidas até 10 s.

9.3.2.2 Curvas de decremento CA dos geradores

Os geradores síncronos são máquinas importantes num sistema elétrico industrial e geralmente possuem documentação bem detalhada. As curvas de decremento fornecidas pelos fabricantes das duas máquinas presentes no estudo de caso constam nos Anexos C.3 e C.4.

O decremento CA de um gerador síncrono pode ser descrito pela equação (9.1) [43].

$$i_{ac} = (i_d'' - i_d') \cdot e^{-\frac{t}{T_d''}} + (i_d' - i_d) \cdot e^{-\frac{t}{T_d'}} + i_d \quad (9.1)$$

Onde:

- i_{ac} : é a magnitude da componente CA da contribuição de curto-circuito;
- i_d'' : é a magnitude da corrente subtransitória;
- i_d' : é a magnitude da corrente transitória;
- i_d : é a magnitude da corrente de curto-circuito de regime permanente;
- T_d'' : é a constante de tempo subtransitória;
- T_d' : é a constante de tempo transitória;
- t : é o tempo em segundos.

A parcela de corrente subtransitória é dada pela equação (9.2).

$$i_d'' = \frac{E''}{X_d''} \quad (9.2)$$

Onde:

- E'' : é a tensão interna da máquina, à montante da reatância subtransitória;
- X_d'' : é a reatância subtransitória de eixo direto (saturada).

A tensão interna da máquina é dada pela equação (9.3).

$$E'' = V_a + X_d'' \cdot \sin\phi \quad (9.3)$$

Onde:

- V_a : é a tensão nos terminais da máquina, antes da falta;
- ϕ : é o ângulo do fator de potência, antes da falta.

A parcela de corrente transitória é dada pela equação (9.4).

$$i_d' = \frac{E'}{X_d'} \quad (9.4)$$

Onde:

- E' : é a tensão interna da máquina, à montante da reatância transitória;
- X_d' : é a reatância transitória de eixo direto (saturada).

A tensão interna da máquina é dada pela equação (9.5).

$$E' = V_a + X'_d \cdot \sin\phi \tag{9.5}$$

A corrente de curto-circuito de regime permanente é dada pela equação (9.6).

$$i_d = \frac{V_a}{X_d} \cdot \left(\frac{i_F}{i_{Fg}} \right) \tag{9.6}$$

Onde:

- X_d : é a reatância síncrona de eixo direto (saturada).
- i_F : é a corrente de campo à plena carga;
- i_{Fg} : é a corrente de campo a vazio.

Para este estudo, utilizou-se os parâmetros reais dos geradores (Quadro 9.1) para gerar suas curvas de decremento CA (Figura 9.2).

Quadro 9.1 – Parâmetros dos geradores síncronos.

Gerador	V_a	$\cos \phi$	X_d''	X_d'	X_d	T_d''	T_d'	i_F	i_{Fg}
TURBO-EXPANSOR	13,8 kV	0,8	0,178	0,239	1,300	30 ms	800 ms	643 A	237 A
TURBINA-GAS	13,8 kV	0,8	0,131	0,186	1,630	30 ms	680 ms	789 A	310 A

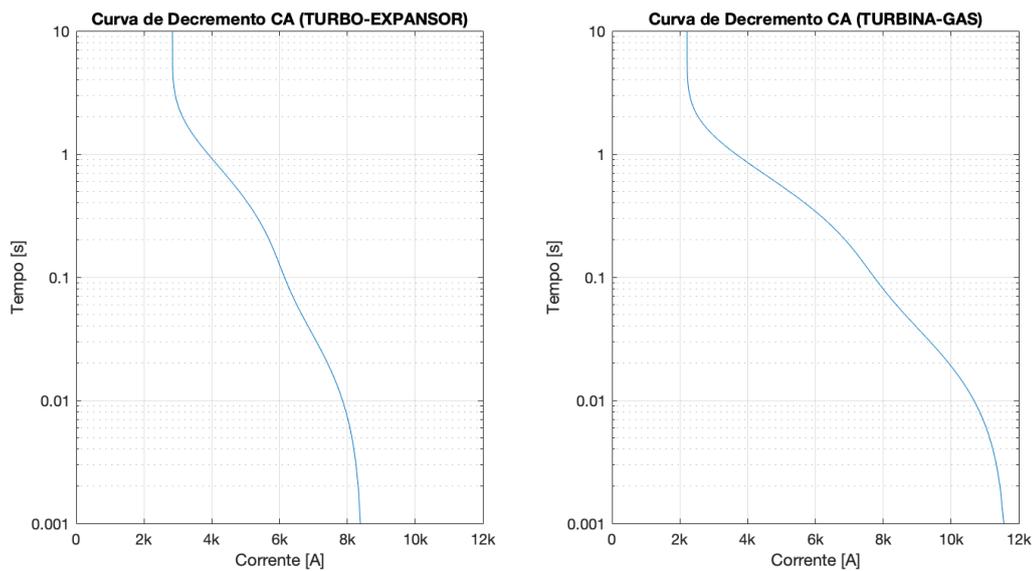


Figura 9.2 – Curvas de decremento dos geradores – Gerada a partir dos parâmetros.

9.3.2.3 Curvas de decremento CA dos motores de indução

Os motores de indução trifásicos são máquinas amplamente utilizadas na indústria. Ainda assim, os parâmetros reais de seu circuito equivalente raramente estão disponíveis na sua documentação. As curvas de decremento CA podem ser descritas pela equação (9.7) [43].

$$i_{ac} = \frac{E}{X_d''} \cdot e^{-\frac{2\pi t}{T_d''}} \quad (9.7)$$

Onde:

- i_{ac} : é a magnitude da componente CA da contribuição de curto-circuito do motor;
- E : é a tensão interna da máquina (pré-falta);
- X_d'' : é a reatância subtransitória de eixo direto do motor;
- T_d'' : é a constante de tempo do decremento CA;
- t : é o tempo em ciclos na frequência nominal do sistema.

Em função da ausência de dados específicos, uma prática comumente aceita [39] é utilizar a reatância de rotor bloqueado X_{lr} como estimativa para X_d'' , e a relação X/R de partida como estimativa de T_d'' (sendo R a resistência do rotor).

A relação X/R de curto-circuito de um motor de indução trifásico depende do porte da máquina, e seus valores típicos podem ser estimados pela Figura 9.3.

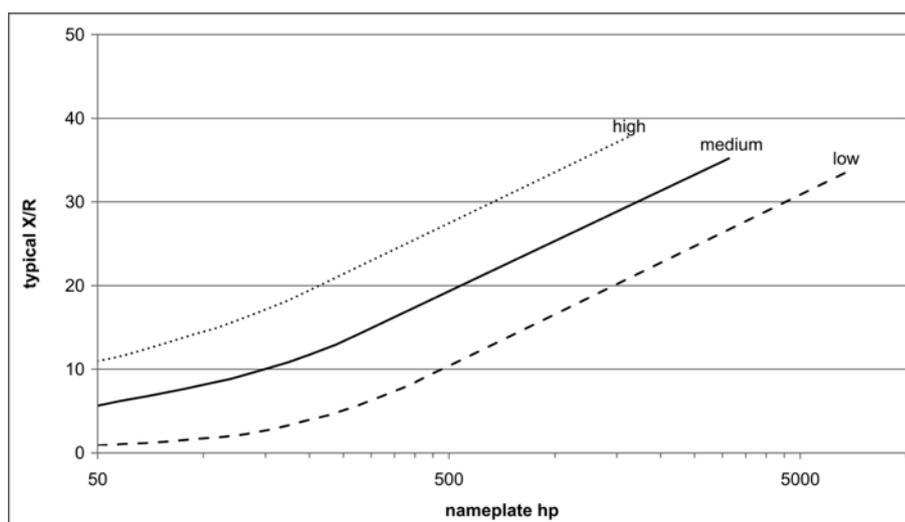


Figura 9.3 – Valores típicos de X/R de motores de indução trifásicos a 60 Hz [45].

Sendo a razão E/X_d'' da equação (9.7) o valor inicial da corrente de decremento CA de um motor de indução, ao se normalizar a equação por este valor ($I_p = 1$ pu), pode-se traçar as curvas de decremento CA para vários portes de motores, conforme indicado na Figura 9.4.

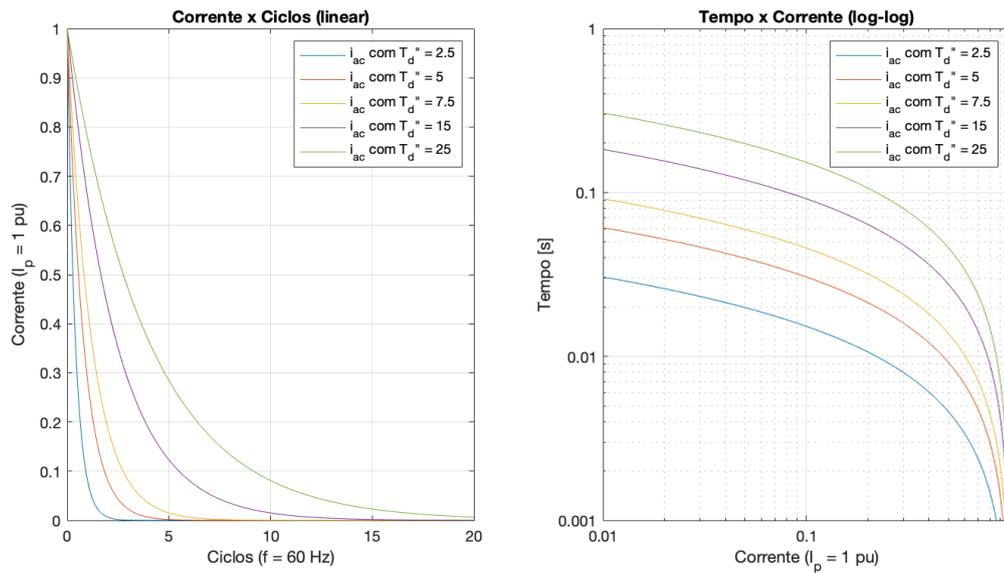


Figura 9.4 – Decremento CA típico de motores de indução trifásicos ($I_p/I_{nom} = 6$).

Pode-se notar que os motores de menor porte, que possuem as menores constantes de tempo (T_d''), apresentam uma queda acentuada na contribuição, que se torna praticamente nula em 2 ciclos. Nos motores de médio porte, a contribuição de curto pode ser considerada desprezível após 4-6 ciclos, e nos motores de maior porte, raramente a contribuição é significativa após 8 ciclos [43].

Com exceção das grandes máquinas, cujo impacto no sistema elétrico é significativo e costumam ser modeladas individualmente, as máquinas de pequeno e médio portes, muito mais numerosas, geralmente são modeladas de forma agrupada e por valores típicos.

A partir da Figura 9.3, pode-se sugerir valores típicos de T_d'' de acordo com a faixa de potência de motores que normalmente são agrupados nos mesmos conjuntos de manobra e comando, conforme indicado no Quadro 9.2.

Quadro 9.2 – Valores típicos de T_d'' de acordo com a faixa de potência.

Tipo de instalação	Faixa de potência típica	T_d'' médio típico
CCM 480 V	< 50 hp	*desprezar
CCM 480 V	50 – 100 hp	5
CDC 480 V	100 – 200 hp	7,5
CDC 4,16 kV	200 – 500 hp	15
CDC 4,16 kV	500 – 1.000 hp	25
CDC 13,8 kV	> 1.000 hp	*realizar estudo específico

Assim, pode-se obter a curva de decremento CA de um grupo de motores semelhantes, multiplicando-se o valor da corrente simétrica inicial calculada pelos softwares de análise de curto-circuito pela curva normalizada com o T_d'' correspondente ao grupo.

9.4 Cálculos de energia incidente

9.4.1 Fluxograma de execução do script

No Estudo de Caso 1 (Capítulo 7), havia uma única fonte de curto-circuito em cada cenário e a corrente de falta franca era constante, proporcionando uma simplicidade na execução dos cálculos de energia incidente, que pode ser verificado pelo fluxograma de execução do script da Figura 7.10.

O Estudo de Caso 2, por outro lado, apresenta uma situação mais complexa, que é a presença de mais de uma fonte contribuindo para o arco elétrico, além do fato que em algumas destas contribuições será considerado o decremento CA. Isto implicará em etapas adicionais na análise, representadas no fluxograma da Figura 9.5.

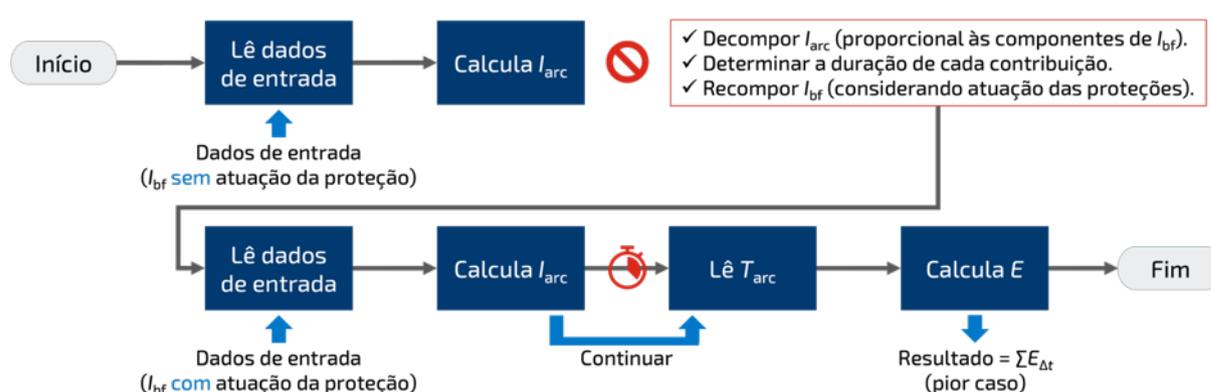


Figura 9.5 – Fluxograma de execução do script para o Estudo de Caso 2.

A parte mais trabalhosa neste processo é determinar a curva da corrente de falta franca considerando as atuações das proteções de cada fonte. Para isto, deve-se primeiro modelar I_{bf} sem a atuação do sistema de proteção, calcular I_{arc} e decompor esta última em componentes, sendo que a proporção destas componentes em relação a I_{arc} total deve ser a mesma que a proporção das componentes de I_{bf} em relação a I_{bf} total. O script então deve ser reiniciado, tendo como dado de entrada a curva de I_{bf} considerando a atuação do sistema de proteção. Como a duração de arco de cada passo de simulação foi predefinida em 1 ms, e a curva de I_{bf} já representa as atuações das proteções, não é necessário avaliar novamente as durações de arco, podendo-se dar continuidade ao script assim que ele calcular as correntes de arco, para finalizar com o cálculo de energia incidente dos segmentos. A energia incidente final deve a soma da energia incidente de todos os segmentos. O limite de aproximação segura de cada segmento é calculado automaticamente pelo script, entretanto, como já comentado, estes valores não são válidos e devem ser desprezados.

9.4.2 Passo-a-passo

Para ilustrar a metodologia, o PN-01A (Figura 9.6) será utilizado como exemplo.

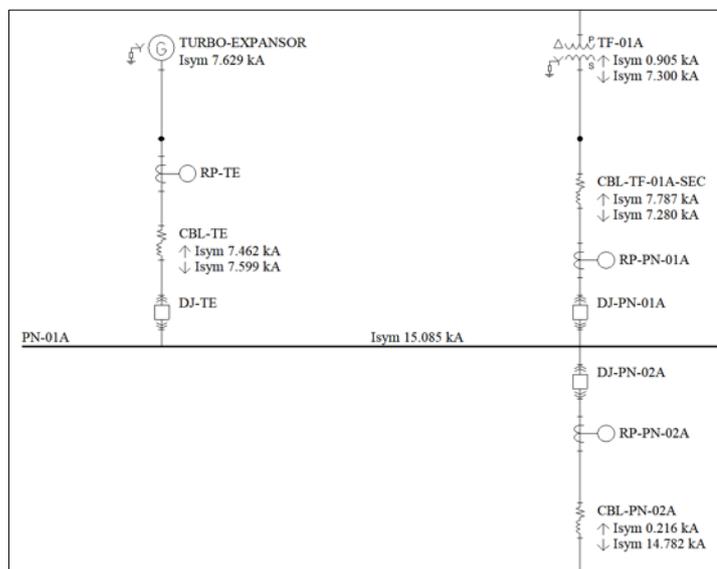


Figura 9.6 – PN-01A: Diagrama unifilar geral.

O PN-01A é um conjunto de manobra e comando de 13,8 kV alimentado pelo sistema elétrico da concessionária através de um transformador abaixador (TF-01A), e por um gerador síncrono (TURBO-EXPANSOR). Pelo estudo de curto-circuito, ele também recebe contribuições dos motores que operam na barra A da subestação.

9.4.2.1 Passo 1: Determinar I_{bf} total (sem atuação da proteção)

Em sistemas com múltiplas fontes de curto-circuito, deve-se traçar as curvas das contribuições de cada fonte para se determinar a corrente de falta franca (I_{bf}) total através da soma destas contribuições. Para determinação das contribuições de acordo com o tipo de fonte, recomenda-se adotar os seguintes critérios:

- **Concessionária:** Considerar contribuição constante, obtida diretamente do estudo de curto-circuito (7,280 kA);
- **Gerador:** Considerar a curva de decremento CA determinada com os parâmetros da máquina aplicados à equação (9.1). O valor do estudo de curto-circuito (7,599 kA) representa o valor simétrico inicial de uma corrente que decai com o tempo;
- **Motores:** Considerar a curva de decremento CA determinada pela equação (9.7), utilizando o valor simétrico inicial do estudo de curto-circuito (0,216 kA) como estimativa para a razão E/X_d'' , e a constante de tempo típica para a faixa de potência do grupo de motores ligados à barra ($T_d'' = 15$), conforme indicado no Quadro 9.2.

A Figura 9.7 apresenta as curvas das três contribuições e a sua soma (I_{bf} total).

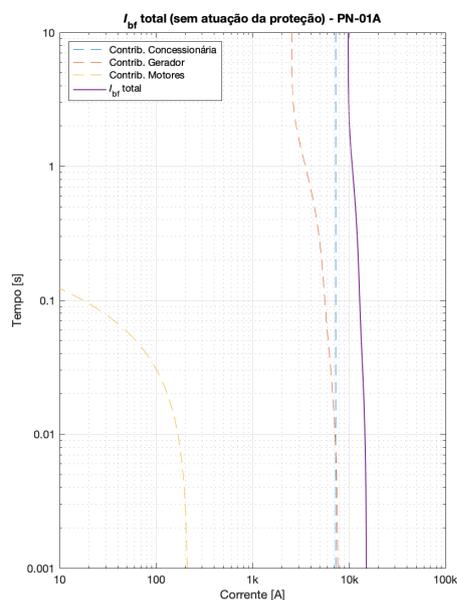


Figura 9.7 – PN-01A: I_{bf} total (sem atuação da proteção).

9.4.2.2 Passo 2: Calcular I_{arc} total

Após a determinação de I_{bf} total, utilizar o script para calcular as correntes de arco (I_{arc}) totais (máxima e mínima) de cada segmento de 1 ms. As curvas obtidas estão apresentadas na Figura 9.8.

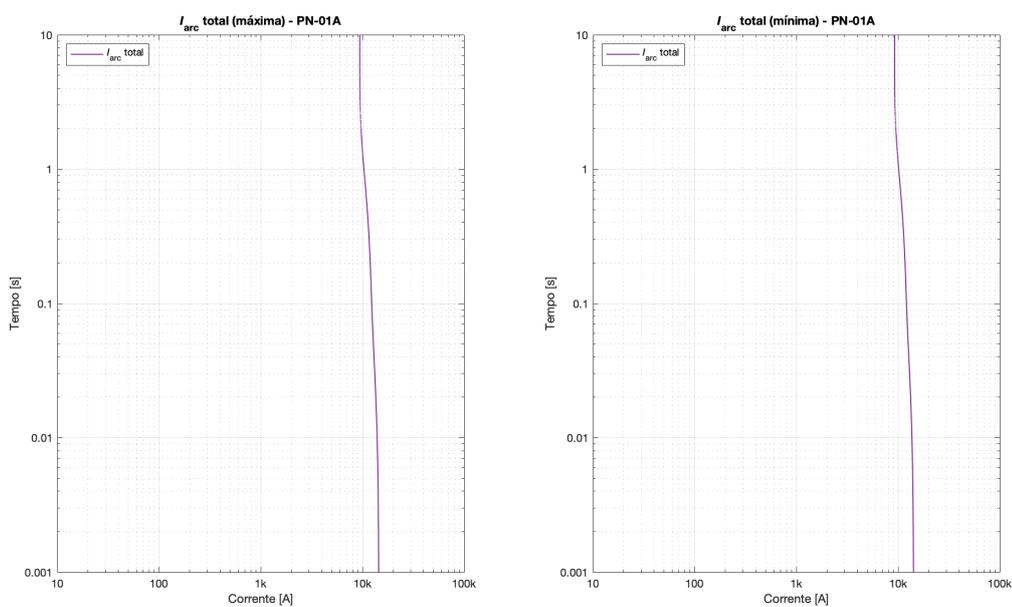


Figura 9.8 – PN-01A: I_{arc} total (máxima e mínima).

9.4.2.3 Passo 3: Decompor I_{arc} total

A corrente de arco (I_{arc}) total (máxima e mínima) é a corrente que flui pelo arco elétrico. Esta corrente é a soma das contribuições das diversas fontes, que por sua vez são as correntes que circulam pelos sistemas de proteção durante um arco elétrico, e que devem ser consideradas para avaliação do tempo de operação dos relés com curva de tempo inverso.

Para a determinação destas contribuições, a IEEE Std 1584-2018 assume que as fontes contribuem para a corrente de arco (I_{arc}) total na mesma proporção que contribuem para a corrente de curto-circuito (I_{bf}) total.

Deste modo, para cada segmento de 1 ms, deve-se calcular a razão entre a magnitude da contribuição de curto-circuito de cada fonte e a magnitude da corrente de curto-circuito (I_{bf}) total (Figura 9.7), e em seguida aplicar esta razão à corrente de arco (I_{arc}) total (Figura 9.8) para se estimar as contribuições de corrente de arco de cada fonte (Figura 9.9).

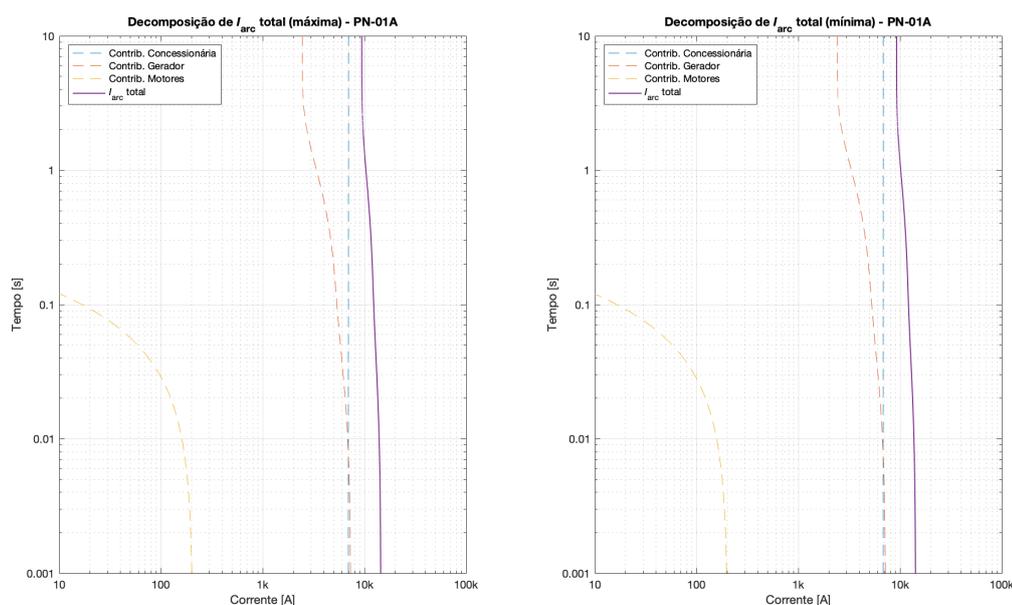


Figura 9.9 – PN-01A: Decomposição de I_{arc} total (máxima e mínima).

9.4.2.4 Passo 4: Determinar a duração de cada contribuição

Como cada contribuição pode ser vista por dispositivos de proteção diferentes, a duração de arco de cada contribuição deve ser avaliada individualmente. Esta tarefa é relativamente simples quando o sistema de proteção é baseado em relés de arco ou de sobrecorrente do tipo tempo definido, mas torna-se particularmente trabalhosa quando depende de proteções do tipo tempo inverso ou ainda do tipo adaptativo.

Para o sistema do estudo, os seguintes atrasos intencionais foram determinados.

- **Concessionária:** Fornece contribuições constantes de 6,96 kA (I_{arcmax}) e 6,83 kA (I_{arcmin}), com atuação da proteção de sobrecorrente do tipo tempo definido, com atraso intencional de 300 ms para ambos os casos;
- **Gerador:** O tempo de operação do relé de proteção é determinado pela função de sobrecorrente com restrição de tensão. Como se trata de uma proteção dinâmica, com pickup adaptativo em função do afundamento de tensão, aliada a uma corrente com decaimento, a forma mais conveniente de se avaliar o tempo de operação é pelo método gráfico, conforme Figura 9.10. A tensão esperada no barramento é inferior a 10% da tensão nominal, resultando no menor multiplicador do pickup de corrente. Os tempos determinados pela curva de 10% de tensão foram 210 e 213 ms para I_{arcmax} e I_{arcmin} , respectivamente;
- **Motores:** Os motores estão à jusante da barra e não provocam a operação de dispositivos de proteção.

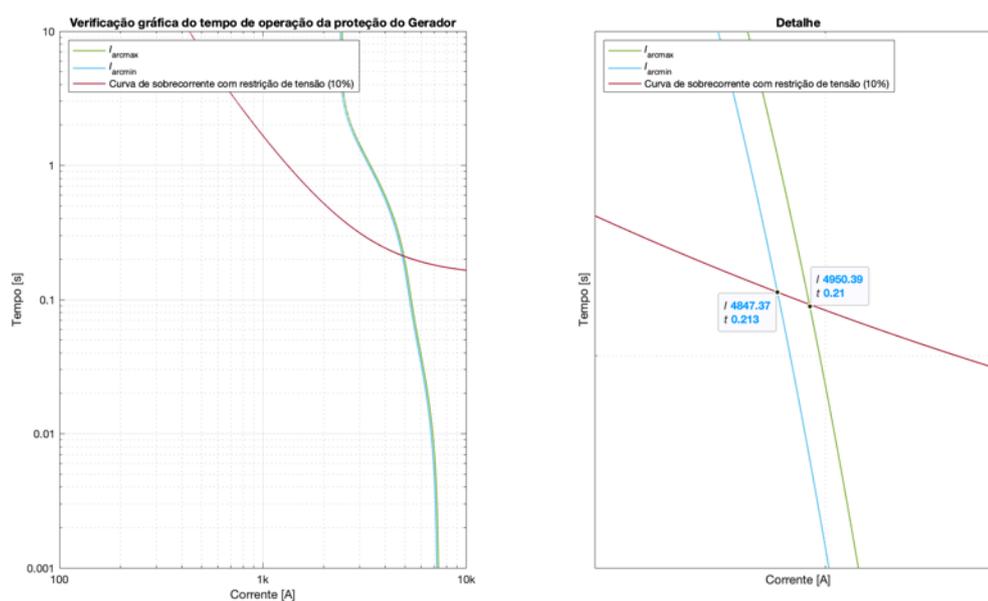


Figura 9.10 – PN-01A: Verificação gráfica do tempo de operação da proteção do Gerador.

O Quadro 9.3 apresenta os tempos considerados na determinação das durações de arco, que incluem os atrasos intencionais dos relés (T_{atraso}), o tempo de operação dos contatos de saída dos relés ($T_{op_relé}$), o tempo de operação do relé de bloqueio eletromecânico (T_{bloq}) e o tempo de operação do disjuntor (T_{dj}).

Quadro 9.3 – Determinação das durações reais das contribuições.

Fonte	Considerando o tempo de atuação devido a I_{arcmax}	Considerando o tempo de atuação devido a I_{arcmin}
Concessionária	$T_{atraso} + T_{op_relé} + T_{bloq} + T_{dj}$ 300 + 15 + 9 + 70 394 ms	$T_{atraso} + T_{op_relé} + T_{bloq} + T_{dj}$ 300 + 15 + 9 + 70 394 ms
Gerador	$T_{atraso} + T_{op_relé} + T_{bloq} + T_{dj}$ 210 + 15 + 9 + 70 304 ms	$T_{atraso} + T_{op_relé} + T_{bloq} + T_{dj}$ 213 + 15 + 9 + 70 307 ms
Motores	n.a.	n.a.

Quando a contribuição dos motores elétricos não provocar a atuação de dispositivos de proteção, deve-se considerar a duração destas contribuições até que se tornem desprezíveis.

9.4.2.5 Passo 5: Determinar I_{bf} total (considerando atuação da proteção)

Após determinadas as durações de cada contribuição, deve-se recompor a corrente de curto-circuito (I_{bf}) total. A rigor, deve ser feita uma curva de corrente de curto-circuito total baseada nas atuações de proteção provocadas pela corrente de arco máxima e outra baseada nas atuações de proteção provocadas pela corrente de arco mínima, conforme Figura 9.11.

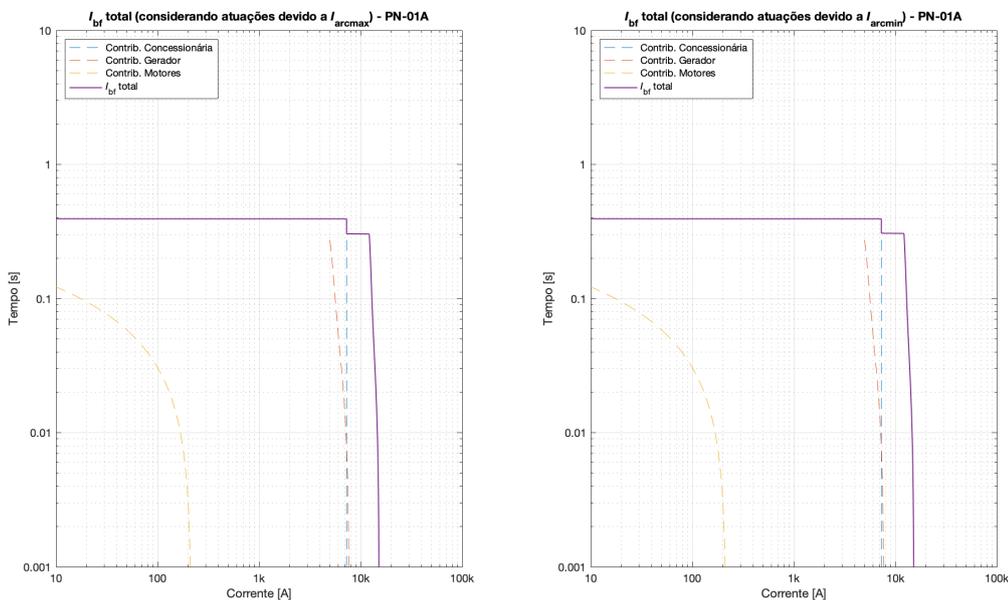


Figura 9.11 – PN-01A: I_{bf} total (considerando atuação da proteção).

Para este caso, as curvas foram muito similares, com uma ligeira diferença provocada pelo efeito da variação de corrente de arco na atuação da proteção do gerador (baseada em curva de tempo inverso). Entretanto, a diferença entre as curvas pode ser significativa, dependendo dos ajustes de proteção, principalmente em sistemas de baixa tensão.

9.4.2.6 Passo 6: Calcular E

A etapa final do estudo é rodar o script com as correntes de curto-circuito definidas em 9.4.2.5, e em seguida somar a energia incidente de cada segmento. Mais precisamente:

- Deve-se rodar o script com a corrente de curto-circuito (I_{bf}) total baseada nas atuações de proteção provocadas por I_{arcmax} , e somar a energia incidente calculada com I_{arcmax} de todos os segmentos para se obter E_{max} ; e,
- Deve-se rodar o script com a corrente de curto-circuito (I_{bf}) total baseada nas atuações de proteção provocadas por I_{arcmin} , e somar a energia incidente calculada com I_{arcmin} de todos os segmentos para se obter E_{min} .

Neste caso, foi feita a soma da energia incidente de 394 segmentos de 1 ms cada. O resultado obtido para E_{max} foi 8,62 cal/cm² e para E_{min} foi 8,67 cal/cm² (ligeiramente maior em função da proteção de sobrecorrente do gerador). Deve ser considerado como valor final de energia incidente o pior caso, ou seja, **8,67 cal/cm²**. A Figura 9.12 apresenta a planilha com parte dos resultados e o somatório final.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1	Name	Config	Voc_kV	WorstCase	Iarc_kA	Tarc_ms	E_Jcm2	E_calcm2	AFB_mm
2	S.1	VCBB	13,8	IarcMin	14,25613133	1	0,121959544	0,029149031	99,92573291
3	S.2	VCBB	13,8	IarcMin	14,19356212	1	0,121398488	0,029014935	99,65171406
4	S.3	VCBB	13,8	IarcMin	14,13287912	1	0,120854459	0,028884909	99,38552181
5	S.4	VCBB	13,8	IarcMin	14,07402168	1	0,120326904	0,028758820	99,12692694
6	S.5	VCBB	13,8	IarcMin	14,01693112	1	0,119815288	0,028636541	98,87570640
391	S.390	VCBB	13,8	IarcMin	6,86572695	1	0,056698103	0,013551172	63,32447558
392	S.391	VCBB	13,8	IarcMin	6,86572666	1	0,056698100	0,013551171	63,32447393
393	S.392	VCBB	13,8	IarcMin	6,86572639	1	0,056698098	0,013551171	63,32447233
394	S.393	VCBB	13,8	IarcMin	6,86572612	1	0,056698095	0,013551170	63,32447077
395	S.394	VCBB	13,8	IarcMin	6,86572585	1	0,056698093	0,013551169	63,32446925
396							TOTAL	8,669362959	

Figura 9.12 – PN-01A: Resultado de energia incidente (E).

9.4.2.7 Passo 7: Calcular AFB

Conforme já discutido em 8.3, enquanto a soma da energia incidente (E) dos segmentos corresponde corretamente à energia incidente total, a soma dos limites de aproximação segura (AFB) dos mesmos segmentos não corresponde ao limite de aproximação segura real, em função da relação não linear entre energia incidente e distância.

Na literatura, não há referências que discutam como fazer o cálculo do limite de aproximação segura em situações com correntes variáveis como no caso do decremento CA. No entanto, de posse do conceito de que o limite de aproximação segura é “a distância da potencial fonte do arco elétrico na qual a energia incidente é calculada em 1,2 cal/cm²”, e que

a distância de trabalho é “a distância na qual é calculada a energia incidente”, pode-se sugerir um método iterativo para se chegar a um valor conceitualmente válido para o limite de aproximação segura. O método consiste em variar a distância de trabalho (D) até que se atinja como resultado a energia incidente (E) de aproximadamente $1,2 \text{ cal/cm}^2$. Quando isto ocorrer, o limite de aproximação segura (AFB) será o último valor utilizado como distância de trabalho (D). A Figura 9.13 apresenta este algoritmo.

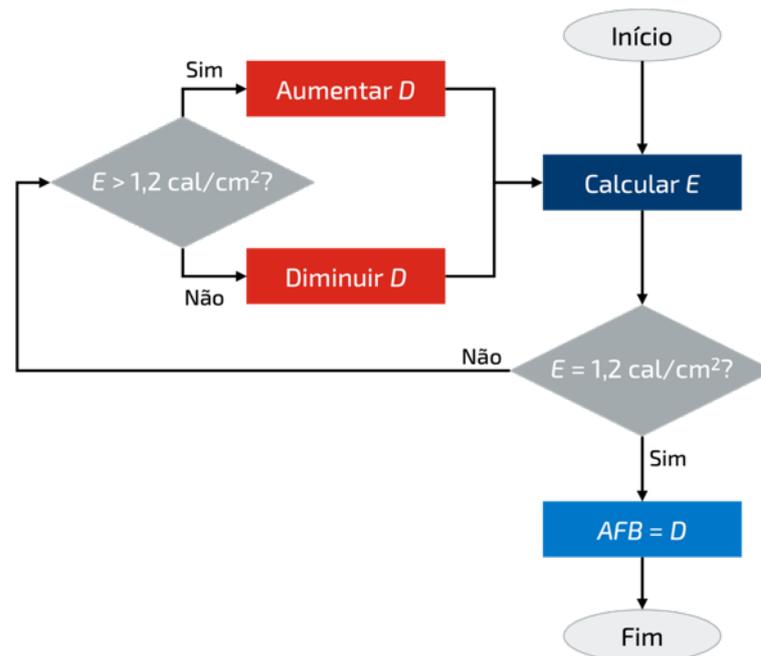


Figura 9.13 – Algoritmo sugerido para cálculo de AFB .

Este trabalho iterativo é facilitado pelo uso do script desenvolvido, com o qual se pode chegar ao resultado em poucas tentativas. Uma sub-rotina para automatizar estes cálculos pode ser desenvolvida.

Para o PN-01A, o valor do limite de aproximação segura calculado foi **2.969 mm**.

9.5 Análise dos resultados

9.5.1 Resultados consolidados

O mesmo método aplicado ao PN-01A para o cálculo da energia incidente e do limite de aproximação segura foi aplicado aos demais conjuntos de manobra e comando do estudo. Foram adotadas as mesmas premissas, ou seja, o cálculo realizado para apenas um compartimento, com dimensões típicas, com o sistema operando na mesma condição. As curvas obtidas se encontram nos anexos C.5 a C.14, e os resultados no Quadro 9.4.

Quadro 9.4 – Resultados.

	V_{oc} [kV]	E [cal/cm ²]	AFB [mm]		V_{oc} [kV]	E [cal/cm ²]	AFB [mm]
PN-01A	13,8	8,67	2.969	PN-01B	13,8	10,49	3.325
PN-02A	13,8	4,87	2.106	PN-02B	13,8	5,56	2.280
PN-03A	4,16	3,62	1.732	PN-03B	4,16	3,70	1.752
PN-04A	0,48	22,11	3.051	PN-04B	0,48	22,34	3.069
PN-05A	0,48	22,06	3.047	PN-05B	0,48	22,31	3.066

Estes resultados serão discutidos posteriormente, através de uma comparação com os resultados sem considerar o decrémento CA (item 9.5.3).

9.5.2 Comparação com o método proposto por Das

No item 9.4.2, foi apresentado, passo-a-passo, a execução de um cálculo de energia incidente (E) com múltiplas fontes de curto-circuito e considerando as curvas de decrémento CA das máquinas rotativas. O método empregado executou o cálculo de energia incidente de pequenos segmentos de 1 ms e, em seguida, a soma dos valores de energia de cada segmento.

A título de comparação, foi realizado o cálculo de energia incidente do mesmo conjunto de manobra e comando pelo método apresentado por Das [43], que sugere a divisão da corrente de curto-circuito em poucos segmentos, com a estimação da corrente média em cada um deles. A Figura 9.14 apresenta a corrente de curto-circuito total (baseada em I_{arcmin}), e as correntes médias de quatro segmentos convenientemente escolhidos.

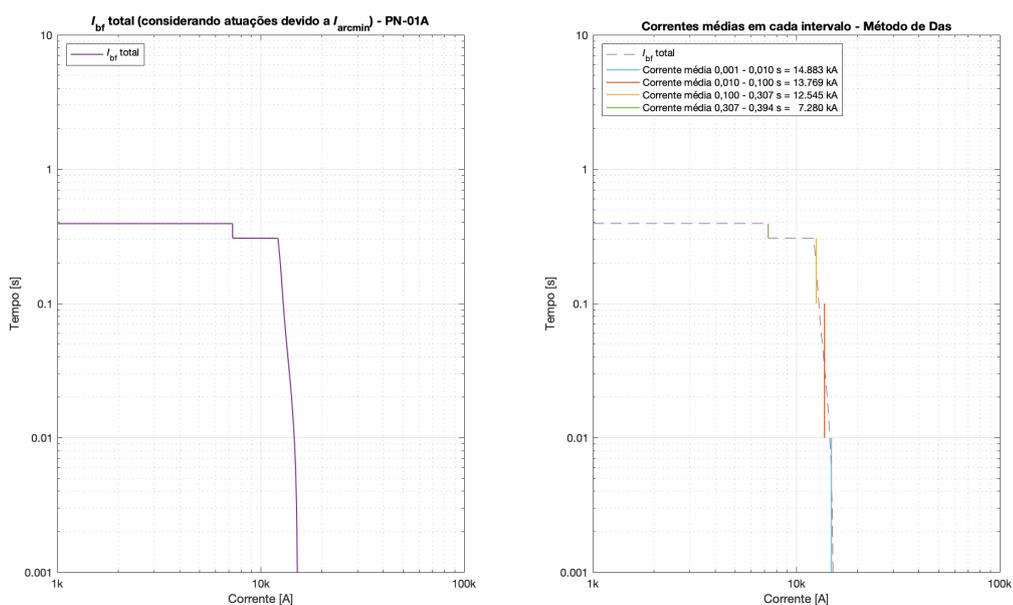


Figura 9.14 – PN-01A: Aplicação do método proposto por Das.

O Quadro 9.5 apresenta o resultado obtido em 9.4.2.6, com passo de simulação de 1 ms, e resultado obtido pelo método proposto por Das. Ambos convergiram para o mesmo valor.

Quadro 9.5 – Comparação de resultados entre o método proposto e o método de Das.

Dissertação		Das	
Segmento [s]	E_{\max} [cal/cm ²]	Segmento [s]	E_{\min} [cal/cm ²]
0,001 – 0,002	0,0291	0,001 – 0,010	0,26
0,002 – 0,003	0,0290	0,010 – 0,100	2,36
...	...	0,100 – 0,307	4,77
0,393 – 0,394	0,0136	0,307 – 0,394	1,27
TOTAL (Σ)	8,67	TOTAL (Σ)	8,67

Tanto no método proposto por Das, quanto no método proposto nesta dissertação, as etapas de preparação dos dados são as mesmas. A principal diferença entre os dois métodos ocorre após a definição da corrente de falta franca no seu formato “real”, *i.e.*, considerando as atuações da proteção. No método proposto por Das, deve-se dividir a curva da corrente de falta franca em poucos segmentos e estimar a corrente média em cada um deles. Isto implica num relativo baixo esforço computacional, no entanto, é necessário uma análise cuidadosa para escolha de segmentos convenientes a fim de minimizar a inexatidão no cálculo de energia incidente. No método proposto nesta dissertação, as correntes são discretizadas em segmentos de 1 ms. Isto implica num maior esforço computacional, pois é necessário um cálculo de energia incidente completo a cada 1 ms, mas elimina a etapa analítica da definição dos segmentos e respectivas correntes médias. Além disso, com a alta capacidade de processamento dos computadores pessoais atuais, e com uma ferramenta de cálculo como o script desenvolvido, milhares de cálculos de energia incidente podem ser facilmente executados em poucos segundos. Por fim, no item 9.4.2.7, foi proposto um método iterativo para determinação do limite de aproximação segura, o que não é mencionado no método de Das.

O Quadro 9.6 apresenta uma comparação entre os métodos.

Quadro 9.6 – Comparação de características entre o método proposto e o método de Das.

	Dissertação	Das
Esforço analítico	MENOR (a curva é discretizada em segmentos de 1 ms)	MAIOR (requer definir segmentos convenientes e calcular suas correntes médias)
Esforço computacional	MAIOR (requer calcular a energia incidente de muitos segmentos)	MENOR (requer calcular a energia incidente de poucos segmentos)
Limite de aproximação segura	SIM (é proposto um método iterativo)	NÃO (o autor não aborda o assunto)

9.5.3 Comparação com o cálculo sem considerar o decremento CA

Para avaliar a diferença entre considerar ou não o decremento CA no estudo de energia incidente, foi feito o cálculo para os dez conjuntos de manobra e comando deste estudo de caso, considerando as correntes de falta constantes e com o mesmo valor da contribuição simétrica inicial obtida no estudo de curto-circuito. Além disso, nos casos em que as contribuições parciais cessam em momentos diferentes, foi considerada a maior duração.

O Quadro 9.7 mostra os resultados dos cálculos realizados nestas condições, e as respectivas diferenças para o estudo base (com decremento CA).

Quadro 9.7 – Comparação entre cálculos com e sem considerar o decremento CA.

Tag	V_{oc} [kV]	E [cal/cm ²] (com decremento CA)	E [cal/cm ²] (sem decremento CA)	diferença (sem/com)
PN-01A	13,8	8,67	11,38	+31%
PN-01B	13,8	10,49	15,69	+50%
PN-02A	13,8	4,87	5,57	+14%
PN-02B	13,8	5,56	6,20	+11%
PN-03A	4,16	3,62	3,88	+7%
PN-03B	4,16	3,70	4,37	+18%
PN-04A	0,48	22,11	23,45	+6%
PN-04B	0,48	22,34	24,66	+10%
PN-05A	0,48	22,06	22,36	+1%
PN-05B	0,48	22,31	23,83	+7%

Como esperado, em todos os casos houve um aumento da energia incidente estimada. Ademais, pode-se afirmar que esta diferença depende principalmente:

- Da proporção que a contribuição das máquinas rotativas representa da corrente de curto-circuito total em uma barra.
 - A maior diferença ocorreu no PN-01B, que é um painel diretamente conectado a um gerador. O aumento na estimativa de energia incidente foi de 50%;
 - A menor diferença ocorreu no PN-05A, que no cenário avaliado estava apenas um motor em operação (MB-300104B). O aumento na estimativa de energia incidente por não se considerar o decremento CA foi desprezível (1%);
- Da duração das contribuições oriundas das máquinas rotativas.
 - Uma vez que a diferença entre a corrente de curto-circuito com e sem decremento CA é nula no tempo igual a zero, a diferença na energia incidente resultante tende a ser desprezível para contribuições muito rápidas, como ilustra a Figura 9.15.

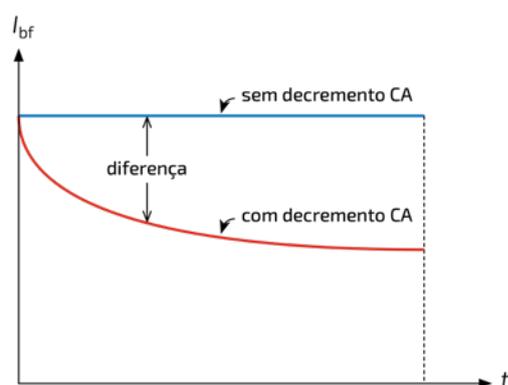


Figura 9.15 – Diferença na contribuição de curto-circuito com e sem decremento CA.

De maneira geral, conforme já discutido em 8.2.2, os softwares comerciais consideram as contribuições de curto-circuito constantes, o que aumenta a estimativa de energia incidente, por um lado favorecendo a proteção do trabalhador (indicando EPIs superdimensionados), por outro penalizando o conforto e até mesmo comprometendo a exequibilidade da tarefa.

9.6 Considerações finais

Este capítulo apresentou uma proposta de roteiro para o cálculo de energia incidente considerando o decremento CA, com base nos conceitos discutidos no Capítulo 8. Também foi proposta uma metodologia para o cálculo do limite de aproximação segura, que se baseou na definição deste conceito, aliado à facilidade de realização do cálculo iterativo através do script.

Por fim, foram avaliados os impactos de se considerar ou não o decremento CA num estudo de energia incidente, sendo que nas situações em que a contribuição das máquinas rotativas é proporcionalmente importante, e que possuem maiores durações de arco, a aplicação desta metodologia de avaliação pode resultar na recomendação de utilização de um EPI otimizado para as equipes de operação e manutenção.

10 CONCLUSÃO

10.1 Considerações finais sobre a dissertação

Este trabalho abordou o arco elétrico como fonte de perigo na indústria, iniciando com uma revisão histórica, passando por um resumo das técnicas de gestão do risco e das tecnologias atuais para mitigação, e tendo como foco o método proposto pela IEEE Std 1584-2018.

O modelo matemático da IEEE Std 1584-2018, por si só, intimida pela necessidade de solução de equações extensas e pouco intuitivas, complementadas por várias tabelas com centenas de coeficientes. Entretanto, após a conclusão do desenvolvimento do script de cálculo, uma tarefa puramente lógica e computacional, é que a parte mais complexa do trabalho ocorre: a aplicação do método.

O primeiro estudo de caso (Capítulo 7) demonstrou que, muito além de um mero cálculo computacional, a avaliação da energia incidente é um estudo de proteção amplo: envolve a busca de informações do estudo de curto-circuito, do estudo de seletividade da proteção, de dados construtivos e até operacionais do sistema. Mais do que uma simples coleta de dados, este processo envolve discernimento técnico para determinar adequadamente vários parâmetros que não são muito evidentes e interpretar resultados. O estudo de caso também mostrou que há uma relação indissociável entre os cálculos e o sistema físico, sendo necessário conhecer tanto o esquema funcional de proteção, quanto o posicionamento dos sensores de corrente e luz efetivamente implementado em campo, sob o risco de o estudo não corresponder à realidade, o que é particularmente grave por estar relacionado à segurança pessoal.

O segundo estudo de caso (Capítulo 9) propôs um roteiro de estudo não somente para o cálculo da energia incidente (E), como também para o cálculo do limite de aproximação segura (AFB). A aplicação de um método concebido para utilizar como dado de entrada uma corrente constante num estudo com correntes variáveis mostrou-se trabalhosa, mas possível, com o script de cálculo desenvolvido. A elaboração deste tipo de estudo requer certo esforço adicional, e sua aplicação deve ser ponderada pelo responsável técnico pelo estudo. Situações em que a contribuição total das máquinas rotativas é pequena em comparação à da concessionária, ou que a proteção de arco é muito rápida, tendem a oferecer menos ganhos em ser realizar este estudo detalhado. Por outro lado, nas situações em que a contribuição das máquinas rotativas é considerável, e que possuem maiores durações de arco, a aplicação desta metodologia de avaliação pode resultar na recomendação de utilização de um EPI otimizado.

Comparando os dois estudos de caso, fica evidente a simplicidade da avaliação de energia incidente proporcionada pela utilização de um sistema de proteção com relés de arco, pois ela elimina a trabalhosa etapa de determinação da duração de arco resultante da interação entre a corrente de arco calculada e a operação de um relé de sobrecorrente com curva do tipo tempo inverso. Esta etapa fica ainda mais trabalhosa quando a corrente de arco é resultante de múltiplas fontes, cujas contribuições podem ter tempos de atuação da proteção distintos.

10.2 Sugestões para trabalhos futuros

Com o objetivo de prosseguir com os estudos relacionados ao tema desta dissertação, são apresentadas a seguir algumas sugestões para trabalhos futuros, considerando os pontos que não foram avaliados neste trabalho ou que ainda carecem de investigações:

- Analisar a influência do método de cálculo de curto-circuito (Teórico \times ANSI \times IEC) no cálculo da energia incidente;
- Comparar os valores de energia incidente calculados com os “valores reais” dos parâmetros construtivos (espaçamento entre eletrodos e dimensões do invólucro) de conjuntos de manobra e comando com os valores de energia incidente calculados com os “valores típicos” desses parâmetros, sugeridos pela IEEE Std 1584-2018;
- Acrescentar uma subrotina no script desenvolvido para calcular o tempo de atuação da proteção tempo dependente considerando o decremento CA.

10.3 Artigos publicados e submetidos

Como artigos associados ao desenvolvimento deste trabalho de mestrado, têm-se:

- “Desenvolvimento e Aplicação de Script para Avaliação de Energia Incidente pelo Método IEEE Std 1584-2018”. *36º Congresso Brasileiro de Manutenção e Gestão de Ativos (CBMGA)*, out/2021, Online. **[PUBLICADO]**
- “Estudo Dinâmico de Energia Incidente Considerando Contribuições de Curto-Circuito com Decremento CA”. *VI IEEE Petroleum and Chemical Industry Conference Brazil (PCIC Brazil)*, jul/2023, Rio de Janeiro. **[SUBMETIDO]**

REFERÊNCIAS

- [1] Institute of Electrical and Electronics Engineers, *IEEE Std 1584-2018 – IEEE Guide for Performing Arc-Flash Hazard Calculations*, New York: IEEE, 2018.
- [2] Institute of Electrical and Electronics Engineers, *IEEE Std 1584-2002 – IEEE Guide for Performing Arc-Flash Hazard Calculations*, New York: IEEE, 2002.
- [3] National Fire Protection Association, *NFPA 70E – Standard for Electrical Safety in the Workplace – 2021 Edition*, Quincy: NFPA, 2021.
- [4] A. Anders, “Tracking Down the Origin of Arc Plasma Science II. Early Continuous Discharges,” *IEEE Transactions on Plasma Sciences*, vol. 31, n° 4, pp. 1060-1069, 2003.
- [5] J. Cadick, M. Capelli-Schellpfeffer e D. Neitzel, *Electrical Safety Handbook*, New York: McGraw-Hill, 2005.
- [6] M. Lang, T. E. Neal e R. Wilkins, “Introduction to arc flash,” em *8th International Conference on Electric Fuses and their Applications*, Clermont-Ferrand, 2007.
- [7] R. H. Lee, “Pressures Developed by Arcs,” *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 23, n° 4, pp. 760-763, 1987.
- [8] C. L. Sulzberger, “Triumph of AC - from Pearl Street to Niagara,” *IEEE Power and Energy Magazine*, vol. 1, n° 3, pp. 64-67, 2003.
- [9] C. L. Sulzberger, “Triumph of AC, part 2 - The battle of the currents,” *IEEE Power and Energy Magazine*, vol. 1, n° 4, pp. 70-73, 2003.
- [10] T. E. Browne Jr, “The Electric Arc as a Circuit Element,” *Journal of The Electrochemical Society*, vol. 102, n° 1, pp. 27-37, 1955.
- [11] R. H. Kaufmann e J. C. Page, “Arcing Fault Protection for Low-Voltage Power Distribution System - Nature of the Problem,” *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers. Part III: Power Apparatus and Systems*, vol. 79, n° 3, pp. 160-165, 1960.
- [12] F. J. Shields, “The Problem of Arcing Faults in Low-Voltage Power Distribution Systems,” *IEEE Transactions on Industry and General Applications*, vol. 3, n° 1, pp. 15-25, 1967.
- [13] R. H. Lee, “The Other Electrical Hazard: Electric Arc Blast Burns,” *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 18, n° 3, pp. 246-251, 1982.
- [14] T. E. Neal, A. H. Bingham e R. L. Doughty, “Protective clothing guidelines for electric arc exposure,” em *43rd IEEE IAS Petroleum and Chemical Industry Committee Annual Conference (PCIC)*, Philadelphia, 1996.
- [15] A. M. Stoll e M. A. Chianta, “A Method and Rating System for Evaluation of Thermal Protection,” U. S. Naval Air Development Center, Warminster, 1968.

- [16] R. L. Doughty, T. E. Neal e H. L. Floyd II, “Predicting Incident Energy to Better Manage the Electric Arc Hazard on 600-V Power Distribution Systems,” em *45th IEEE IAS Petroleum and Chemical Industry Committee Annual Conference (PCIC)*, Indianapolis, 1998.
- [17] G. Parise, L. Parise e E. Berenato, “Basic Measures Assisting the Avoidance of Arc Flash,” *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 54, n° 2, pp. 1842-1847, 2018.
- [18] National Fire Protection Association, *NFPA 70E – Standard for Electrical Safety in the Workplace – 1995 Edition*, Quincy: NFPA, 1995.
- [19] BRASIL, *Norma Regulamentadora No 10*, Brasília: MTPS, 2016.
- [20] Associação Brasileira de Normas Técnicas, *ABNT NBR 16384 – Segurança em eletricidade – Recomendações e orientações para trabalho seguro em serviços com eletricidade*, Rio de Janeiro: ABNT, 2020.
- [21] International Organization for Standardization, *ISO 31000:2018 - Risk management - Guidelines*, Geneva: ISO, 2018.
- [22] International Organization for Standardization, *ISO 45001:2018 – Occupational health and safety management systems – Requirements with guidance for use*, Geneva: ISO, 2018.
- [23] D. R. Doan, “Arc Flash Calculations for Exposures to DC Systems,” *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 46, n° 6, pp. 2299-2302, 2010.
- [24] S. Faried e W. Hakelberg, “Arc Flash - IEEE 1584-2018, NFPA 70E 2018, & OSHA Final Rule Highlights and Arc Flash Mitigation Technologies,” em *2019 IEEE-IAS/PCA Cement Industry Conference (IAS/PCA)*, St Louis, 2019.
- [25] E. F. M. Sato, *Segurança em Eletricidade: Um estudo de caso sobre percepção de riscos elétricos em profissionais de manutenção industrial*, Manaus: UEA, 2010.
- [26] International Electrotechnical Commission, *IEC 62271-200 – High-voltage switchgear and controlgear – Part 200: AC metal-enclosed switchgear and controlgear for rated voltages above 1 kV and up to and including 52 kV*, Geneva: IEC, 2011.
- [27] Institute of Electrical and Electronics Engineers, *IEEE Std C37.20.7-2017 – IEEE Guide for Testing Switchgear Rated Up to 52 kV for Internal Arcing Faults*, New York: IEEE, 2017.
- [28] International Electrotechnical Commission, *IEC TR 61641 – Enclosed low-voltage switchgear and controlgear assemblies – Guide for testing under conditions of arcing due to internal fault*, Geneva: IEC, 2014.
- [29] ASTM International, *F1959/F1959M - Standard Test Method for Determining the Arc Rating of Materials for Clothing*, West Conshohocken: ASTM International, 2014.
- [30] D. Beeman, *Industrial Power Systems Handbook*, New York: McGraw-Hill, 1955.
- [31] ABB, “Arc Vault™ Protection System,” ABB, [Online]. Available: <https://electrification.us.abb.com/products/switchgear/arc-vault-protection-system>. [Acesso em 28 06 2020].

- [32] Eaton, “Arc Quenching Magnum DS low-voltage switchgear,” Eaton, [Online]. Available: <https://www.eaton.com/us/en-us/catalog/low-voltage-power-distribution-controls-systems/arc-quenching-magnum-ds-low-voltage-switchgear.html>. [Acesso em 28 06 2020].
- [33] ABB, “Ultra-Fast Earthing Switch UFES,” ABB, [Online]. Available: <https://new.abb.com/medium-voltage/apparatus/arc-fault-protection/ultra-fast-earthing-switch-ufes>. [Acesso em 28 06 2020].
- [34] Arcteq, “Arc Quenching Devices,” Arcteq, [Online]. Available: <https://arcteq.fi/applications/arc-quenching-device/>. [Acesso em 28 06 2020].
- [35] Siemens, “SIQuench: Arc fault protection beyond the standards,” Siemens, [Online]. Available: <https://new.siemens.com/global/en/products/energy/medium-voltage/systems/siquench.html>. [Acesso em 28 06 2020].
- [36] International Electrotechnical Commission, *IEC 60947-9-1 – Low-voltage switchgear and controlgear – Part 9-1: Active arc-fault mitigation systems – Arc quenching devices*, Geneva: IEC, 2019.
- [37] Underwriters Laboratories, *UL 2748 – Arcing Fault Quenching Equipment*, Northbrook: UL, 2019.
- [38] Associação Brasileira de Normas Técnicas, *ABNT NBR 16295 – Luvas de material isolante*, Rio de Janeiro: ABNT, 2014.
- [39] Institute of Electrical and Electronics Engineers, *IEEE Std 551-2006 – IEEE Recommended Practice for Calculating Short-Circuit Currents in Industrial and Commercial Power Systems*, New York: IEEE, 2006.
- [40] International Electrotechnical Commission, *IEC 60909-0 – Short-circuit currents in three-phase a.c. systems*, Geneva: IEC, 2001.
- [41] A. Majd, R. Luo, M. A. Devadass e J. Phillips, “Comprehensive Overview and Comparison of ANSI vs. IEC Short Circuit Calculations: Using IEC Short Circuit Results in IEEE 1584 Arc Flash Calculations,” em *65th IEEE IAS Petroleum and Chemical Industry Committee Annual Conference (PCIC)*, Cincinnati, 2018.
- [42] ARCAD INC, “ArcAdvisor,” ARCAD INC, [Online]. Available: <https://app.arcadvisor.com/about>. [Acesso em 14 06 2020].
- [43] J. C. Das, *Arc Flash Hazard Analysis and Mitigation*, Hoboken: John Wiley & Sons, 2021.
- [44] GE Electrical Distribution & Control, *Application Information - Short-Circuit Current Calculations For Industrial and Commercial Power Systems*, Plainville: General Electric Company, 1989.
- [45] Institute of Electrical and Electronics Engineers, *IEEE Std C37.010-2016 – IEEE Guide for AC High-Voltage Circuit Breakers > 1000 Vac Rated on a Symmetrical Current Basis*, New York: IEEE, 2016.

ANEXO A – Tabelas da NFPA 70E-2021

A.1 Tabela 130.5(C)

Table 130.5(C) Estimate of the Likelihood of Occurrence of an Arc Flash Incident for ac and dc Systems

Task	Equipment Condition ^a	Likelihood of Occurrence ^b
Reading a panel meter while operating a meter switch.	Any	No
Performing infrared thermography and other non-contact inspections outside the restricted approach boundary. This activity does not include opening of doors or covers.		
Working on control circuits with exposed energized electrical conductors and circuit parts, nominal 125 volts ac or dc, or below without any other exposed energized equipment over nominal 125 volts ac or dc, including opening of hinged covers to gain access.		
Examination of insulated cable with no manipulation of cable.		
For dc systems, maintenance on a single cell of a battery system or multi-cell units in an open rack.		
For ac systems, work on energized electrical conductors and circuit parts, including electrical testing.	Any	Yes
Operation of a CB or switch the first time after installation or completion of maintenance in the equipment.		
For dc systems, working on energized electrical conductors and circuit parts of series-connected battery cells, including electrical testing.		
Removal or installation of CBs or switches.		
Opening hinged door(s) or cover(s) or removal of bolted covers (to expose bare, energized electrical conductors and circuit parts). For dc systems, this includes bolted covers, such as battery terminal covers.		
Application of temporary protective grounding equipment, after voltage test.		
Working on control circuits with exposed energized electrical conductors and circuit parts, greater than 120 volts.		
Insertion or removal of individual starter buckets from motor control center (MCC).		
Insertion or removal (racking) of circuit breakers (CBs) or starters from cubicles, doors open or closed.		
Insertion or removal of plug-in devices into or from busways.		
Examination of insulated cable with manipulation of cable.		
Working on exposed energized electrical conductors and circuit parts of equipment directly supplied by a panelboard or motor control center.		
Insertion or removal of revenue meters (kW-hour, at primary voltage and current).		
Insertion or removal of covers for battery intercell connector(s).		
For dc systems, working on exposed energized electrical conductors and circuit parts of utilization equipment directly supplied by a dc source.		
Opening voltage transformer or control power transformer compartments.		
Operation of outdoor disconnect switch (hookstick operated) at 1 kV through 15 kV.		
Operation of outdoor disconnect switch (gang-operated, from grade) at 1 kV through 15 kV.		
Operation of a CB, switch, contactor, or starter.	Normal	No
Voltage testing on individual battery cells or individual multi-cell units.		
Removal or installation of covers for equipment such as wireways, junction boxes, and cable trays that does not expose bare, energized electrical conductors and circuit parts.		
Opening a panelboard hinged door or cover to access dead front overcurrent devices.		
Removal of battery nonconductive intercell connector covers.		

(continues)

Table 130.5(C) *Continued*

Task	Equipment Condition ^a	Likelihood of Occurrence ^b
Maintenance and testing on individual battery cells or individual multi-cell units in an open rack	Abnormal	Yes
Insertion or removal of individual cells or multi-cell units of a battery system in an open rack.		
Arc-resistant equipment with the DOORS CLOSED and SECURED, and where the available fault current and fault clearing time does not exceed that of the arc-resistant rating of the equipment in one of the following conditions:		
(1) Insertion or removal of individual starter buckets		
(2) Insertion or removal (racking) of CBs from cubicles		
(3) Insertion or removal (racking) of ground and test device		
(4) Insertion or removal (racking) of voltage transformers on or off the bus		

^aEquipment is considered to be in a “normal operating condition” if all of the conditions in 110.4(D) are satisfied.

^bAs defined in this standard, the two components of risk are the likelihood of occurrence of injury or damage to health and the severity of injury or damage to health that results from a hazard. Risk assessment is an overall process that involves estimating both the likelihood of occurrence and severity to determine if additional protective measures are required. The estimate of the likelihood of occurrence contained in this table does not cover every possible condition or situation, nor does it address severity of injury or damage to health. Where this table identifies “No” as an estimate of likelihood of occurrence, it means that an arc flash incident is not likely to occur. Where this table identifies “Yes” as an estimate of likelihood of occurrence, it means an arc flash incident should be considered likely to occur. The likelihood of occurrence must be combined with the potential severity of the arcing incident to determine if additional protective measures are required to be selected and implemented according to the hierarchy of risk control identified in 110.5(H)(3).

Informational Note No. 1: An example of a standard that provides information for arc-resistant equipment referred to in Table 130.5(C) is IEEE C37.20.7, *Guide for Testing Switchgear Rated Up to 52 kV for Internal Arcing Faults*.

Informational Note No. 2: Improper or inadequate maintenance can result in increased fault clearing time of the overcurrent protective device, thus increasing the incident energy. Where equipment is not properly installed or maintained, PPE selection based on incident energy analysis or the PPE category method might not provide adequate protection from arc flash hazards.

Informational Note No. 3: Both larger and smaller available fault currents could result in higher incident energy. If the available fault current increases without a decrease in the fault clearing time of the overcurrent protective device, the incident energy will increase. If the available fault current decreases, resulting in a longer fault clearing time for the overcurrent protective device, incident energy could also increase.

Informational Note No. 4: The occurrence of an arcing fault inside an enclosure produces a variety of physical phenomena very different from a bolted fault. For example, the arc energy resulting from an arc developed in the air will cause a sudden pressure increase and localized overheating. Equipment and design practices are available to minimize the energy levels and the number of procedures that could expose an employee to high levels of incident energy. Proven designs such as arc-resistant switchgear, remote racking (insertion or removal), remote opening and closing of switching devices, high-resistance grounding of low-voltage and 5000-volt (nominal) systems, current limitation, and specification of covered bus or covered conductors within equipment are available to reduce the risk associated with an arc flash incident. See Informative Annex O for safety-related design requirements.

Informational Note No. 5: For additional direction for performing maintenance on overcurrent protective devices, see Chapter 2, Safety-Related Maintenance Requirements.

Informational Note No. 6: See IEEE 1584, *Guide for Performing Arc Flash Hazard Calculations*, for more information regarding incident energy and the arc flash boundary for three-phase systems.

A.2 Tabela 130.7(C)(15)(a)

Table 130.7(C)(15)(a) Arc Flash PPE Categories for Alternating Current (ac) Systems

Equipment	Arc Flash PPE Category	Arc Flash Boundary
Panelboards or other equipment rated 240 volts and below Parameters: Maximum of 25 kA available fault current; maximum of 0.03 sec (2 cycles) fault clearing time; minimum working distance 455 mm (18 in.)	1	485 mm (19 in.)
Panelboards or other equipment rated greater than 240 volts and up to 600 volts Parameters: Maximum of 25 kA available fault current; maximum of 0.03 sec (2 cycles) fault clearing time; minimum working distance 455 mm (18 in.)	2	900 mm (3 ft)
600-volt class motor control centers (MCCs) Parameters: Maximum of 65 kA available fault current; maximum of 0.03 sec (2 cycles) fault clearing time; minimum working distance 455 mm (18 in.)	2	1.5 m (5 ft)
600-volt class motor control centers (MCCs) Parameters: Maximum of 42 kA available fault current; maximum of 0.33 sec (20 cycles) fault clearing time; minimum working distance 455 mm (18 in.)	4	4.3 m (14 ft)
600-volt class switchgear (with power circuit breakers or fused switches) and 600-volt class switchboards Parameters: Maximum of 35 kA available fault current; maximum of up to 0.5 sec (30 cycles) fault clearing time; minimum working distance 455 mm (18 in.)	4	6 m (20 ft)
Other 600-volt class (277 volts through 600 volts, nominal) equipment Parameters: Maximum of 65 kA available fault current; maximum of 0.03 sec (2 cycles) fault clearing time; minimum working distance 455 mm (18 in.)	2	1.5 m (5 ft)
NEMA E2 (fused contactor) motor starters, 2.3 kV through 7.2 kV Parameters: Maximum of 35 kA available fault current; maximum of up to 0.24 sec (15 cycles) fault clearing time; minimum working distance 910 mm (36 in.)	4	12 m (40 ft)
Metal-clad switchgear, 1 kV through 15 kV Parameters: Maximum of 35 kA available fault current; maximum of up to 0.24 sec (15 cycles) fault clearing time; minimum working distance 910 mm (36 in.)	4	12 m (40 ft)
Metal enclosed interrupter switchgear, fused or unfused type construction, 1 kV through 15 kV Parameters: Maximum of 35 kA available fault current; maximum of 0.24 sec (15 cycles) fault clearing time; minimum working distance 910 mm (36 in.)	4	12 m (40 ft)
Other equipment 1 kV through 15 kV Parameters: Maximum of 35 kA available fault current; maximum of up to 0.24 sec (15 cycles) fault clearing time; minimum working distance 910 mm (36 in.)	4	12 m (40 ft)
Arc-resistant equipment up to 600-volt class Parameters: DOORS CLOSED and SECURED; with an available fault current and a fault clearing time that does not exceed the arc-resistant rating of the equipment*	N/A	N/A
Arc-resistant equipment 1 kV through 15 kV Parameters: DOORS CLOSED and SECURED; with an available fault current and a fault clearing time that does not exceed the arc-resistant rating of the equipment*	N/A	N/A

N/A: Not applicable

Note:

For equipment rated 600 volts and below and protected by upstream current-limiting fuses or current-limiting molded case circuit breakers sized at 200 amperes or less, the arc flash PPE category can be reduced by one number but not below arc flash PPE category 1.

*For DOORS OPEN refer to the corresponding non-arc-resistant equipment section of this table.

Informational Note No. 1 to Table 130.7(C)(15)(a): The following are typical fault clearing times of overcurrent protective devices:

(1) 0.5 cycle fault clearing time is typical for current-limiting fuses and current-limiting molded case circuit breakers when the fault current is within the current limiting range.

(2) 1.5 cycle fault clearing time is typical for molded case circuit breakers rated less than 1000 volts with an instantaneous integral trip.

(3) 3.0 cycle fault clearing time is typical for insulated case circuit breakers rated less than 1000 volts with an instantaneous integral trip or relay operated trip.

(4) 5.0 cycle fault clearing time is typical for relay operated circuit breakers rated 1 kV to 35 kV when the relay operates in the instantaneous range (i.e., "no intentional delay").

(5) 20 cycle fault clearing time is typical for low-voltage power and insulated case circuit breakers with a short time fault clearing delay for motor inrush.

(6) 30 cycle fault clearing time is typical for low-voltage power and insulated case circuit breakers with a short time fault clearing delay without instantaneous trip.

Informational Note No. 2 to Table 130.7(C)(15)(a): See Table 1 of IEEE 1584, *Guide for Performing Arc Flash Hazard Calculations*, for further information regarding list items (2) through (4) in Informational Note No. 1.

Informational Note No. 3 to Table 130.7(C)(15)(a): An example of a standard that provides information for arc-resistant equipment referred to in Table 130.7(C)(15)(a) is IEEE C37.20.7, *Guide for Testing Switchgear Rated Up to 52 kV for Internal Arcing Faults*.

Informational Note No. 4 to Table 130.7(C)(15)(a): See O.2.4(9) for information on arc-resistant equipment.

A.3 Tabela 130.7(C)(15)(b)

Table 130.7(C)(15)(b) Arc Flash PPE Categories for dc Systems

Equipment	Arc Flash PPE Category	Arc Flash Boundary
Storage batteries, dc switchboards, and other dc supply sources Parameters: Greater than or equal to 100 volts and less than or equal to 250 volts Maximum arc duration and minimum working distance: 2 sec @ 455 mm (18 in.)		
Available fault current less than 4 kA	2	900 mm (3 ft)
Available fault current greater than or equal to 4 kA and less than 7 kA	2	1.2 m (4 ft)
Available fault current greater than or equal to 7 kA and less than 15 kA	3	1.8 m (6 ft)
Storage batteries, dc switchboards, and other dc supply sources Parameters: Greater than 250 volts and less than or equal to 600 volts Maximum arc duration and minimum working distance: 2 sec @ 455 mm (18 in.)		
Available fault current less than 1.5 kA	2	900 mm (3 ft)
Available fault current greater than or equal to 1.5 kA and less than 3 kA	2	1.2 m (4 ft)
Available fault current greater than or equal to 3 kA and less than 7 kA	3	1.8 m (6 ft)
Available fault current greater than or equal to 7 kA and less than 10 kA	4	2.5 m (8 ft)

Notes:

(1) Apparel that can be expected to be exposed to electrolyte must meet both of the following conditions:

- (a) Be evaluated for electrolyte protection

Informational Note: ASTM F1296, *Standard Guide for Evaluating Chemical Protective Clothing*, contains information on evaluating apparel for protection from electrolyte.

- (b) Be arc-rated

Informational Note: ASTM F1891, *Standard Specification for Arc and Flame Resistant Rainwear*, contains information on evaluating arc-rated apparel.

(2) A two-second arc duration is assumed if there is no overcurrent protective device (OCPD) or if the fault clearing time is not known. If the fault clearing time is known and is less than 2 seconds, an incident energy analysis could provide a more representative result.

Informational Note No. 1: When determining available fault current, the effects of cables and any other impedances in the circuit should be included. Power system modeling is the best method to determine the available short-circuit current at the point of the arc. Battery cell short-circuit current can be obtained from the battery manufacturer. See D.5 for the basis for table values and alternative methods to determine dc incident energy. Methods should be used with good engineering judgment.

Informational Note No. 2: The methods for estimating the dc arc flash incident energy that were used to determine the categories for this table are based on open-air incident energy calculations. Open-air calculations were used because many battery systems and other dc process systems are in open areas or rooms. If the specific task is within an enclosure, it would be prudent to consider additional PPE protection beyond the value shown in this table.

ANEXO B – Código do script para MATLAB

B.1 Script principal: *IEEE1584_2018.m*

```
# Código
1 %==== HEADING
2 disp(' ')
3 disp('***** Arc-Flash Hazard Calculations *****')
4 disp('Method: IEEE Std 1584™-2018')
5 disp('Author: Edson Fernando Machado Sato')
6 disp('Script: Version 1.2')
7 disp(' ')
8
9 %==== READ: Input Data
10 T_SystemInfo = readtable('SystemInfo.xlsx');
11 Name = T_SystemInfo.Name; % Identification
12 Config = T_SystemInfo.Config; % Electrode Configuration
13 Voc_kV = T_SystemInfo.Voc_kV; % Open Circuit Voltage [kV]
14 Ibf_kA = T_SystemInfo.Ibf_kA; % Bolted Fault Current [kA]
15 Gap_mm = T_SystemInfo.Gap_mm; % Gap [mm]
16 WkD_mm = T_SystemInfo.WkD_mm; % Working Distance [mm]
17 H = T_SystemInfo.H_mm; % Height [mm]
18 W = T_SystemInfo.W_mm; % Width [mm]
19 D = T_SystemInfo.D_mm; % Depth [mm]
20 N = height(T_SystemInfo);
21
22 %==== CHECK: Quality of Data and Range of Model
23 [checkflag, CheckResults, EC] = checkdata(N, Name, Config, Voc_kV, Ibf_kA, Gap_mm, WkD_mm, H, W, D);
24 if checkflag == 0
25     disp(CheckResults)
26     disp('*** All parameters are valid! ***')
27     disp(' ')
28 else
29     disp(CheckResults)
30     disp('*** Some parameters are in bad quality or out of range. Script execution aborted! ***')
31     disp(' ')
32     return
33 end
34
35 %==== CALCULATE: Maximum Arcing Current
36 Iarcmax_006 = zeros(N,1);
37 Iarcmax_027 = zeros(N,1);
38 Iarcmax_143 = zeros(N,1);
39 Iarcmax_kA = zeros(N,1);
40 Tmax_ms = zeros(N,1);
41 for i = 1:N
42     Iarcmax_006(i) = intercurrent(EC(i), Ibf_kA(i), Gap_mm(i), 600);
43     if Voc_kV(i) <= 0.6
44         Iarcmax_kA(i) = 1/sqrt((0.6/Voc_kV(i))^2*((1/Iarcmax_006(i)^2)-(0.6^2-Voc_kV(i)^2)/(0.6^2*Ibf_kA(i)^2)));
45     else
46         Iarcmax_027(i) = intercurrent(EC(i), Ibf_kA(i), Gap_mm(i), 2700);
47         Iarcmax_143(i) = intercurrent(EC(i), Ibf_kA(i), Gap_mm(i), 14300);
48         Iarcmax_kA(i) = finalvalues(Iarcmax_006(i), Iarcmax_027(i), Iarcmax_143(i), Voc_kV(i));
49     end
50 end
51
52 %==== CALCULATE: Arcing Current Variation Correction Factor
53 VarCf = zeros(N,2);
54 for i = 1:N
55     VarCf(i,1) = currentvarcf(EC(i), Voc_kV(i));
56     VarCf(i,2) = 1-0.5*VarCf(i,1);
57 end
58
59 %==== CALCULATE: Minimum Arcing Current
60 Iarcmin_006 = zeros(N,1);
61 Iarcmin_027 = zeros(N,1);
62 Iarcmin_143 = zeros(N,1);
63 Iarcmin_kA = zeros(N,1);
64 for i = 1:N
65     if Voc_kV(i) <= 0.6
66         Iarcmin_kA(i) = 1/sqrt((0.6/Voc_kV(i))^2*((1/Iarcmax_006(i)^2)-(0.6^2-Voc_kV(i)^2)/(0.6^2*Ibf_kA(i)^2))*VarCf(i,2));
67     else
68         Iarcmin_006(i) = Iarcmax_006(i,1)*VarCf(i,2);
69         Iarcmin_027(i) = Iarcmax_027(i,1)*VarCf(i,2);
70         Iarcmin_143(i) = Iarcmax_143(i,1)*VarCf(i,2);
71         Iarcmin_kA(i) = finalvalues(Iarcmin_006(i), Iarcmin_027(i), Iarcmin_143(i), Voc_kV(i));
72     end
73 end
74
75 %==== WRITE: Arcing Currents
76 T_arcmax = table(Name, Config, Iarcmax_kA);
77 writetable(T_arcmax, 'Iarc.xlsx', 'WriteMode', 'inplace', 'Sheet', 'IarcMax');
78 T_arcmin = table(Name, Config, Iarcmin_kA);
79 writetable(T_arcmin, 'Iarc.xlsx', 'WriteMode', 'inplace', 'Sheet', 'IarcMin');
80
81 %==== WAIT USER
82 prompt = 'Please fill arc duration (T_ms) in "Iarc.xlsx".\nContinue? Y/N [Y]: ';
83 str = input(prompt, 's');
84 if isempty(str)
85     str = 'Y';
86 end
87 if str == 'N' || str == 'n'
88     return
89 end
90
91 %==== READ: Arcing Duration
```

```

# Código
92 T_arcmax = readtable('Iarc.xlsx','Sheet','IarcMax');
93 Tmax_ms = T_arcmax.T_ms;
94 T_arcmin = readtable('Iarc.xlsx','Sheet','IarcMin');
95 Tmin_ms = T_arcmin.T_ms;
96
97 %==== CALCULATE: Enclosure Size Correction Factor
98 CF = zeros(N,1);
99 for i = 1:N
100     if EC(i) == 1 || EC(i) == 2 || EC(i) == 3
101         CF(i) = enclosurecf(EC(i),Voc_kv(i),H(i),W(i),D(i));
102     else
103         CF(i) = 1;
104     end
105 end
106
107 %==== CALCULATE: Incident Energy @ Maximum Arcing Current
108 Emax_low = zeros(N,1);
109 Emax_006 = zeros(N,1);
110 Emax_027 = zeros(N,1);
111 Emax_143 = zeros(N,1);
112 Emax_Jcm2 = zeros(N,1);
113 Emax_calcm2 = zeros(N,1);
114 for i = 1:N
115     if Voc_kv(i) <= 0.6
116         Emax_low(i) = interenergy(EC(i),Tmax_ms(i),Gap_mm(i),Iarcmax_006(i),Ibf_ka(i),WkD_mm(i),Iarcmax_ka(i),CF(i),480);
117         Emax_Jcm2(i) = Emax_low(i);
118     else
119         Emax_006(i) = interenergy(EC(i),Tmax_ms(i),Gap_mm(i),Iarcmax_006(i),Ibf_ka(i),WkD_mm(i),Iarcmax_ka(i),CF(i),600);
120         Emax_027(i) = interenergy(EC(i),Tmax_ms(i),Gap_mm(i),Iarcmax_027(i),Ibf_ka(i),WkD_mm(i),Iarcmax_ka(i),CF(i),2700);
121         Emax_143(i) = interenergy(EC(i),Tmax_ms(i),Gap_mm(i),Iarcmax_143(i),Ibf_ka(i),WkD_mm(i),Iarcmax_ka(i),CF(i),14300);
122         Emax_Jcm2(i) = finalvalues(Emax_006(i),Emax_027(i),Emax_143(i),Voc_kv(i));
123     end
124     Emax_calcm2(i) = Emax_Jcm2(i)/4.184;
125 end
126
127 %==== CALCULATE: Arc-Flash Boundary @ Maximum Arcing Current
128 AFBmax_low = zeros(N,1);
129 AFBmax_006 = zeros(N,1);
130 AFBmax_027 = zeros(N,1);
131 AFBmax_143 = zeros(N,1);
132 AFBmax_mm = zeros(N,1);
133 for i = 1:N
134     if Voc_kv(i) <= 0.6
135         AFBmax_low(i) = interboundary(EC(i),Gap_mm(i),Iarcmax_006(i),Ibf_ka(i),Iarcmax_ka(i),CF(i),Tmax_ms(i),480);
136         AFBmax_mm(i) = AFBmax_low(i);
137     else
138         AFBmax_006(i) = interboundary(EC(i),Gap_mm(i),Iarcmax_006(i),Ibf_ka(i),Iarcmax_ka(i),CF(i),Tmax_ms(i),600);
139         AFBmax_027(i) = interboundary(EC(i),Gap_mm(i),Iarcmax_027(i),Ibf_ka(i),Iarcmax_ka(i),CF(i),Tmax_ms(i),2700);
140         AFBmax_143(i) = interboundary(EC(i),Gap_mm(i),Iarcmax_143(i),Ibf_ka(i),Iarcmax_ka(i),CF(i),Tmax_ms(i),14300);
141         AFBmax_mm(i) = finalvalues(AFBmax_006(i),AFBmax_027(i),AFBmax_143(i),Voc_kv(i));
142     end
143 end
144
145 %==== DISPLAY: Results @ Maximum Arcing Current
146 T_resultsmax = table(Name,Config,Voc_kv,Iarcmax_ka,Tmax_ms,Emax_Jcm2,Emax_calcm2,AFBmax_mm);
147 disp(' ')
148 disp('Results with Maximum Arcing Current:')
149 disp(' ')
150 disp(T_resultsmax)
151
152 %==== CALCULATE: Incident Energy @ Minimum Arcing Current
153 Emin_low = zeros(N,1);
154 Emin_006 = zeros(N,1);
155 Emin_027 = zeros(N,1);
156 Emin_143 = zeros(N,1);
157 Emin_Jcm2 = zeros(N,1);
158 Emin_calcm2 = zeros(N,1);
159 for i = 1:N
160     if Voc_kv(i) <= 0.6
161         Emin_low(i) = interenergy(EC(i),Tmin_ms(i),Gap_mm(i),Iarcmin_006(i),Ibf_ka(i),WkD_mm(i),Iarcmin_ka(i),CF(i),480);
162         Emin_Jcm2(i) = Emin_low(i);
163     else
164         Emin_006(i) = interenergy(EC(i),Tmin_ms(i),Gap_mm(i),Iarcmin_006(i),Ibf_ka(i),WkD_mm(i),Iarcmin_ka(i),CF(i),600);
165         Emin_027(i) = interenergy(EC(i),Tmin_ms(i),Gap_mm(i),Iarcmin_027(i),Ibf_ka(i),WkD_mm(i),Iarcmin_ka(i),CF(i),2700);
166         Emin_143(i) = interenergy(EC(i),Tmin_ms(i),Gap_mm(i),Iarcmin_143(i),Ibf_ka(i),WkD_mm(i),Iarcmin_ka(i),CF(i),14300);
167         Emin_Jcm2(i) = finalvalues(Emin_006(i),Emin_027(i),Emin_143(i),Voc_kv(i));
168     end
169     Emin_calcm2(i) = Emin_Jcm2(i)/4.184;
170 end
171
172 %==== CALCULATE: Arc-Flash Boundary @ Minimum Arcing Current
173 AFBmin_low = zeros(N,1);
174 AFBmin_006 = zeros(N,1);
175 AFBmin_027 = zeros(N,1);
176 AFBmin_143 = zeros(N,1);
177 AFBmin_mm = zeros(N,1);
178 for i = 1:N
179     if Voc_kv(i) <= 0.6
180         AFBmin_low(i) = interboundary(EC(i),Gap_mm(i),Iarcmin_006(i),Ibf_ka(i),Iarcmin_ka(i),CF(i),Tmin_ms(i),480);
181         AFBmin_mm(i) = AFBmin_low(i);
182     else
183         AFBmin_006(i) = interboundary(EC(i),Gap_mm(i),Iarcmin_006(i),Ibf_ka(i),Iarcmin_ka(i),CF(i),Tmin_ms(i),600);
184         AFBmin_027(i) = interboundary(EC(i),Gap_mm(i),Iarcmin_027(i),Ibf_ka(i),Iarcmin_ka(i),CF(i),Tmin_ms(i),2700);
185         AFBmin_143(i) = interboundary(EC(i),Gap_mm(i),Iarcmin_143(i),Ibf_ka(i),Iarcmin_ka(i),CF(i),Tmin_ms(i),14300);
186         AFBmin_mm(i) = finalvalues(AFBmin_006(i),AFBmin_027(i),AFBmin_143(i),Voc_kv(i));
187     end
188 end
189
190 %==== DISPLAY: Results @ Minimum Arcing Current
191 T_resultsmin = table(Name,Config,Voc_kv,Iarcmin_ka,Tmin_ms,Emin_Jcm2,Emin_calcm2,AFBmin_mm);
192 disp(' ')
193 disp('Results with Minimum Arcing Current:')
194 disp(' ')
195 disp(T_resultsmin)
196
197 %==== SUMMARIZE: Worst Case
198 WorstCase = cell(N,1);
199 Iarc_ka = zeros(N,1);

```

```

# Código
200 Tarc_ms = zeros(N,1);
201 E_Jcm2 = zeros(N,1);
202 E_calcm2 = zeros(N,1);
203 AFB_mm = zeros(N,1);
204 for i = 1:N
205     if Emax_Jcm2(i) >= Emin_Jcm2(i)
206         WorstCase(i) = {'IarcMax'};
207         Iarc_kA(i) = Iarcmax_kA(i);
208         Tarc_ms(i) = Tmax_ms(i);
209         E_Jcm2(i) = Emax_Jcm2(i);
210         E_calcm2(i) = Emax_calcm2(i);
211         AFB_mm(i) = AFBmax_mm(i);
212     else
213         WorstCase(i) = {'IarcMin'};
214         Iarc_kA(i) = Iarcmin_kA(i);
215         Tarc_ms(i) = Tmin_ms(i);
216         E_Jcm2(i) = Emin_Jcm2(i);
217         E_calcm2(i) = Emin_calcm2(i);
218         AFB_mm(i) = AFBmin_mm(i);
219     end
220 end
221
222 %==== DISPLAY: Worst Case
223 T_summary = table(Name,Config,Voc_kV,WorstCase,Iarc_kA,Tarc_ms,E_Jcm2,E_calcm2,AFB_mm);
224 disp('Worst case:')
225 disp(' ')
226 disp(T_summary)
227
228 %==== WRITE: Final Results
229 writetable(T_summary,'Results.xlsx','WriteMode','inplace','Sheet','Results_WorstCase')
230 writetable(T_resultsmax,'Results.xlsx','WriteMode','inplace','Sheet','Results_IarcMax')
231 writetable(T_resultsmin,'Results.xlsx','WriteMode','inplace','Sheet','Results_IarcMin')

```

B.2 Função: *checkdata.m*

```

# Código
1 % Function:      checkdata
2 % Reference:     IEEE Std 1584™–2018 4.2
3 % Input Data:   N: Quantity of evaluations
4 %               Name: Identification [text]
5 %               Config: Electrode Configuration [text]
6 %               Voc_kV: Open Circuit Voltage [kV]
7 %               Ibf_kA: Bolted Fault Current [kA]
8 %               Gap_mm: Gap [mm]
9 %               WkD_mm: Working Distance [mm]
10 %              H_mm: Height [mm]
11 %              W_mm: Width [mm]
12 %              D_mm: Depth [mm]
13 % Output Data:  checkflag: 1 = bad quality/out of range; 0 = all data OK
14 %              T_Results: Table with Results
15 %              EC: Electrode Configuration [number]
16 % Author:      Edson Fernando Machado Sato
17
18 function [checkflag,T_Results,EC] = checkdata(N,Name,Config,Voc_kV,Ibf_kA,Gap_mm,WkD_mm,H_mm,W_mm,D_mm)
19 EC = zeros(N,1);
20 Result = zeros(N,1);
21 Result = num2cell(Result);
22 checkflag = 0;
23 for i = 1:N
24     Result(i,1) = {' ':};
25     local_qlyflg = 0;
26     if strcmp(Config(i),'VCB')
27         EC(i)=1;
28         elseif strcmp(Config(i),'VCBB')
29             EC(i)=2;
30         elseif strcmp(Config(i),'HCB')
31             EC(i)=3;
32         elseif strcmp(Config(i),'VOA')
33             EC(i)=4;
34         elseif strcmp(Config(i),'HOA')
35             EC(i)=5;
36     else
37         Result(i,1) = append(Result(i,1),' Config');
38         local_qlyflg = 1;
39     end
40     if isnan(Voc_kV(i)) == true
41         Result(i,1) = append(Result(i,1),' Voc');
42         local_qlyflg = 1;
43     end
44     if isnan(Ibf_kA(i)) == true
45         Result(i,1) = append(Result(i,1),' Ibf');
46         local_qlyflg = 1;
47     end
48     if isnan(Gap_mm(i)) == true
49         Result(i,1) = append(Result(i,1),' Gap');
50         local_qlyflg = 1;
51     end
52     if isnan(WkD_mm(i)) == true
53         Result(i,1) = append(Result(i,1),' WorkD');
54         local_qlyflg = 1;
55     end
56     if EC(i) == 1 || EC(i) == 2 || EC(i) == 3
57         if isnan(H_mm(i)) == true
58             Result(i,1) = append(Result(i,1),' H');
59             local_qlyflg = 1;
60         end
61         if isnan(W_mm(i)) == true
62             Result(i,1) = append(Result(i,1),' W');
63             local_qlyflg = 1;
64         end
65         if Voc_kV(i) < 0.6
66             if isnan(D_mm(i)) == true
67                 Result(i,1) = append(Result(i,1),' D');
68                 local_qlyflg = 1;
69             end
70         end
71     end
72     if local_qlyflg == 1
73         Result(i,1) = append('BAD QUALITY',Result(i,1));
74         checkflag = 1;
75     else
76         local_rngflg = 0;
77         if Voc_kV(i) < 0.208 || Voc_kV(i) > 15
78             Result(i,1) = append(Result(i,1),' Voc');
79             local_rngflg = 1;
80         end
81         if Voc_kV(i) <= 0.6
82             if Ibf_kA(i) < 0.5 || Ibf_kA(i) > 106
83                 Result(i,1) = append(Result(i,1),' Ibf');
84                 local_rngflg = 1;
85             end
86         else
87             if Ibf_kA(i) < 0.2 || Ibf_kA(i) > 65
88                 Result(i,1) = append(Result(i,1),' Ibf');
89                 local_rngflg = 1;
90             end
91         end
92         if Voc_kV(i) <= 0.6
93             if Gap_mm(i) < 6.35 || Gap_mm(i) > 76.2
94                 Result(i,1) = append(Result(i,1),' Gap');
95                 local_rngflg = 1;
96             end
97         else
98             if Gap_mm(i) < 19.05 || Gap_mm(i) > 254
99                 Result(i,1) = append(Result(i,1),' Gap');
100                local_rngflg = 1;
101            end
102        end

```

```
# Código e0

---

  
103 if WkD_mm(i) < 305 % Working distance  
104     Result(i,1) = append(Result(i,1), ' WorkD');  
105     local_rngflg = 1;  
106 end  
107 if EC(i) == 1 || EC(i) == 2 || EC(i) == 3  
108     if W_mm(i) <= (4 * Gap_mm(i)) % Minimum width  
109         Result(i,1) = append(Result(i,1), ' MinWidth');  
110         local_rngflg = 1;  
111     end  
112 end  
113 if local_rngflg == 1  
114     Result(i,1) = append('OUT OF RANGE',Result(i,1));  
115     checkflag = 1;  
116 else  
117     Result(i,1) = {'OK'}; % ===== NO ERRORS FOUND =====  
118 end  
119 end  
120 end  
121 T_Results = table(Name,Config,Voc_kV,Ibf_kA,Gap_mm,WkD_mm,H_mm,W_mm,D_mm,Result);  
122 end
```

B.3 Função: *intercurrent.m*

```

# Código
1 % Function: intercurrent
2 % Reference: IEEE Std 1584™-2018 4.4
3 % Input Data: EC: Electrode Configuration (VCB=1, VCBB=2, HCB=3, VOA=4, HOA=5)
4 % Ibf: Bolted Fault Current [kA]
5 % G: Gap [mm]
6 % Voc: Open Circuit Voltage [V]
7 % Output Data: Iarc: Arcing Current at Voc [kA]
8 % Author: Edson Fernando Machado Sato
9
10 function [Iarc] = intercurrent(EC,Ibf,G,Voc)
11 if Voc == 600 % Table 1 - Coefficients for Equation (1) - 600 V
12     table1 = [
13         -4.28700E-02    1.03500E+00    -8.30000E-02    0.00000E+00    0.00000E+00
14         -4.78300E-09    1.96200E-06    -2.29000E-04    3.14100E-03    1.09200E+00 % VCB 600V
15         -1.74320E-02    9.80000E-01    -5.00000E-02    0.00000E+00    0.00000E+00
16         -5.76700E-09    2.52400E-06    -3.40000E-04    1.18700E-02    1.01300E+00 % VCBB 600V
17         5.49220E-02    9.88000E-01    -1.10000E-01    0.00000E+00    0.00000E+00
18         -5.38200E-09    2.31600E-06    -3.02000E-04    9.10000E-03    9.72500E-01 % HCB 600V
19         4.37850E-02    1.04000E+00    -1.80000E-01    0.00000E+00    0.00000E+00
20         -4.78300E-09    1.96200E-06    -2.29000E-04    3.14100E-03    1.09200E+00 % VOA 600V
21         1.11147E-01    1.00800E+00    -2.40000E-01    0.00000E+00    0.00000E+00
22         -3.89500E-09    1.64100E-06    -1.97000E-04    2.61500E-03    1.10000E+00 ]; % HOA 600V
23 elseif Voc == 2700 % Table 1 - Coefficients for Equation (1) - 2700 V
24     table1 = [
25         6.50000E-03    1.00100E+00    -2.40000E-02    -1.55700E-12    4.55600E-10
26         -4.18600E-08    8.34600E-07    5.48200E-05    -3.19100E-03    9.72900E-01 % VCB 2.700V
27         2.82300E-03    9.95000E-01    -1.25000E-02    0.00000E+00    -9.20400E-11
28         2.90100E-08    -3.26200E-06    1.56900E-04    -4.00300E-03    9.82500E-01 % VCBB 2.700V
29         1.01100E-03    1.00300E+00    -2.49000E-02    0.00000E+00    0.00000E+00
30         4.85900E-10    -1.81400E-07    -9.12800E-06    -7.00000E-04    9.88100E-01 % HCB 2.700V
31         -2.39500E-02    1.00600E+00    -1.88000E-02    -1.55700E-12    4.55600E-10
32         -4.18600E-08    8.34600E-07    5.48200E-05    -3.19100E-03    9.72900E-01 % VOA 2.700V
33         4.35000E-04    1.00600E+00    -3.80000E-02    0.00000E+00    0.00000E+00
34         7.85900E-10    -1.91400E-07    -9.12800E-06    -7.00000E-04    9.98100E-01 ]; % HOA 2.700V
35 elseif Voc == 14300 % Table 1 - Coefficients for Equation (1) - 14300 V
36     table1 = [
37         5.79500E-03    1.01500E+00    -1.10000E-02    -1.55700E-12    4.55600E-10
38         -4.18600E-08    8.34600E-07    5.48200E-05    -3.19100E-03    9.72900E-01 % VCB 14.300V
39         1.48270E-02    1.01000E+00    -1.00000E-02    0.00000E+00    -9.20400E-11
40         2.90100E-08    -3.26200E-06    1.56900E-04    -4.00300E-03    9.82500E-01 % VCBB 14.300V
41         8.69300E-03    9.99000E-01    -2.00000E-02    0.00000E+00    -5.04300E-11
42         2.23300E-08    -3.04600E-06    1.16000E-04    -1.14500E-03    9.83900E-01 % HCB 14.300V
43         5.37100E-03    1.01020E+00    -2.90000E-02    -1.55700E-12    4.55600E-10
44         -4.18600E-08    8.34600E-07    5.48200E-05    -3.19100E-03    9.72900E-01 % VOA 14.300V
45         9.04000E-04    9.99000E-01    -2.00000E-02    0.00000E+00    0.00000E+00
46         7.85900E-10    -1.91400E-07    -9.12800E-06    -7.00000E-04    9.98100E-01 ]; % HOA 14.300V
47 else
48     disp('Error!')
49 end
50 k1 = table1(EC,1);
51 k2 = table1(EC,2);
52 k3 = table1(EC,3);
53 k4 = table1(EC,4);
54 k5 = table1(EC,5);
55 k6 = table1(EC,6);
56 k7 = table1(EC,7);
57 k8 = table1(EC,8);
58 k9 = table1(EC,9);
59 k10 = table1(EC,10);
60 Iarc = 10^(k1+k2*log10(Ibf)+k3*log10(G))*(k4*Ibf^6+k5*Ibf^5+k6*Ibf^4+k7*Ibf^3+k8*Ibf^2+k9*Ibf+k10);
61 End

```

B.4 Função: *interenergy.m*

```

# Código
1 % Function: interenergy
2 % Reference: IEEE Std 1584™-2018 4.6
3 % Input Data: EC: Electrode Configuration (VCB=1, VCBB=2, HCB=3, VOA=4, HOA=5)
4 % T: Arc Duration [ms]
5 % G: Gap [mm]
6 % Iarc_voc: Arcing Current at Voc [kA]
7 % Ibf: Bolted Fault Current [kA]
8 % D: Working Distance [mm]
9 % Iarc: Arcing Current for V <= 600 V [kA]
10 % CF: Enclosure Size Correction Factor
11 % Voc: Open Circuit Voltage [V]
12 % Output Data: E: Incident Energy at Voc [J/cm^2]
13 % Author: Edson Fernando Machado Sato
14
15 function [E] = interenergy(EC,T,G,Iarc_voc,Ibf,D,Iarc,CF,Voc)
16 if Voc < 600 % Table 3 - Coefficients for Equation (3), Equation (6), Equation (7) and Equation (10) - 600 V
17     table = [
18         7.53364E-01 5.66000E-01 1.75264E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 -4.78300E-09 1.96200E-06
19         -2.29000E-04 3.14100E-03 1.09200E+00 0.00000E+00 -1.59800E+00 9.57000E-01 % VCB
20         3.06846E+00 2.60000E-01 -9.81070E-02 0.00000E+00 0.00000E+00 -5.76700E-09 2.52400E-06
21         -3.40000E-04 1.18700E-02 1.01300E+00 -6.00000E-02 -1.80900E+00 1.19000E+00 % VCBB
22         4.07375E+00 3.44000E-01 -3.70259E-01 0.00000E+00 0.00000E+00 -5.38200E-09 2.31600E-06
23         -3.02000E-04 9.10000E-03 9.72500E-01 0.00000E+00 -2.03000E+00 1.03600E+00 % HCB
24         6.79294E-01 7.46000E-01 1.22264E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 -4.78300E-09 1.96200E-06
25         -2.29000E-04 3.14100E-03 1.09200E+00 0.00000E+00 -1.59800E+00 9.97000E-01 % VOA
26         3.47042E+00 4.65000E-01 -2.61863E-01 0.00000E+00 0.00000E+00 -3.89500E-09 1.64100E-06
27         -1.97000E-04 2.61500E-03 1.10000E+00 0.00000E+00 -1.99000E+00 1.04000E+00 ]; % HOA
28     elseif Voc == 600 % Table 3 - Coefficients for Equation (3), Equation (6), Equation (7) and Equation (10) - 600 V
29         table = [
30             7.53364E-01 5.66000E-01 1.75264E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 -4.78300E-09 1.96200E-06
31             -2.29000E-04 3.14100E-03 1.09200E+00 0.00000E+00 -1.59800E+00 9.57000E-01 % VCB
32             3.06846E+00 2.60000E-01 -9.81070E-02 0.00000E+00 0.00000E+00 -5.76700E-09 2.52400E-06
33             -3.40000E-04 1.18700E-02 1.01300E+00 -6.00000E-02 -1.80900E+00 1.19000E+00 % VCBB
34             4.07375E+00 3.44000E-01 -3.70259E-01 0.00000E+00 0.00000E+00 -5.38200E-09 2.31600E-06
35             -3.02000E-04 9.10000E-03 9.72500E-01 0.00000E+00 -2.03000E+00 1.03600E+00 % HCB
36             6.79294E-01 7.46000E-01 1.22264E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 -4.78300E-09 1.96200E-06
37             -2.29000E-04 3.14100E-03 1.09200E+00 0.00000E+00 -1.59800E+00 9.97000E-01 % VOA
38             3.47042E+00 4.65000E-01 -2.61863E-01 0.00000E+00 0.00000E+00 -3.89500E-09 1.64100E-06
39             -1.97000E-04 2.61500E-03 1.10000E+00 0.00000E+00 -1.99000E+00 1.04000E+00 ]; % HOA
40         Iarc = Iarc_voc;
41     elseif Voc == 2700 % Table 4 - Coefficients for Equation (4) and Equation (8) - 2700 V
42         table = [
43             2.40021E+00 1.65000E-01 3.54202E-01 -1.55700E-12 4.55600E-10 -4.18600E-08 8.34600E-07
44             5.48200E-05 -3.19100E-03 9.72900E-01 0.00000E+00 -1.56900E+00 9.77800E-01 % VCB
45             3.87059E+00 1.85000E-01 -7.36618E-01 0.00000E+00 -9.20400E-11 2.90100E-08 -3.26200E-06
46             1.56900E-04 -4.00300E-03 9.82500E-01 0.00000E+00 -1.74200E+00 1.09000E+00 % VCBB
47             3.48639E+00 1.77000E-01 -1.93101E-01 0.00000E+00 0.00000E+00 4.85900E-10 -1.81400E-07
48             -9.12800E-06 -7.00000E-04 9.88100E-01 2.70000E-02 -1.72300E+00 1.05500E+00 % HCB
49             3.88072E+00 1.05000E-01 -1.90603E+00 -1.55700E-12 4.55600E-10 -4.18600E-08 8.34600E-07
50             5.48200E-05 -3.19100E-03 9.72900E-01 0.00000E+00 -1.51500E+00 1.11500E+00 % VOA
51             3.61627E+00 1.49000E-01 -7.61561E-01 0.00000E+00 0.00000E+00 7.85900E-10 -1.91400E-07
52             -9.12800E-06 -7.00000E-04 9.98100E-01 0.00000E+00 -1.63900E+00 1.07800E+00 ]; % HOA
53         Iarc = Iarc_voc;
54     elseif Voc == 14300 % Table 5 - Coefficients for Equation (5) and Equation (9) - 14300 V
55         table = [
56             3.82592E+00 1.10000E-01 -9.99749E-01 -1.55700E-12 4.55600E-10 -4.18600E-08 8.34600E-07
57             5.48200E-05 -3.19100E-03 9.72900E-01 0.00000E+00 -1.56800E+00 9.90000E-01 % VCB
58             3.64431E+00 2.15000E-01 -5.85522E-01 0.00000E+00 -9.20400E-11 2.90100E-08 -3.26200E-06
59             1.56900E-04 -4.00300E-03 9.82500E-01 0.00000E+00 -1.67700E+00 1.06000E+00 % VCBB
60             3.04452E+00 1.25000E-01 2.45106E-01 0.00000E+00 -5.04300E-11 2.23300E-08 -3.04600E-06
61             1.16000E-04 -1.14500E-03 9.83900E-01 0.00000E+00 -1.65500E+00 1.08400E+00 % HCB
62             3.40545E+00 1.20000E-01 -9.32450E-01 -1.55700E-12 4.55600E-10 -4.18600E-08 8.34600E-07
63             5.48200E-05 -3.19100E-03 9.72900E-01 0.00000E+00 -1.53400E+00 9.79000E-01 % VOA
64             2.04049E+00 1.77000E-01 1.00509E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 7.85900E-10 -1.91400E-07
65             -9.12800E-06 -7.00000E-04 9.98100E-01 -5.00000E-02 -1.63300E+00 1.15100E+00 ]; % HOA
66         Iarc = Iarc_voc;
67     else
68         disp('Error!')
69     end
70     k1 = table(EC,1);
71     k2 = table(EC,2);
72     k3 = table(EC,3);
73     k4 = table(EC,4);
74     k5 = table(EC,5);
75     k6 = table(EC,6);
76     k7 = table(EC,7);
77     k8 = table(EC,8);
78     k9 = table(EC,9);
79     k10 = table(EC,10);
80     k11 = table(EC,11);
81     k12 = table(EC,12);
82     k13 = table(EC,13);
83     E = (12.552/50)*T*10^(k1+k2*log10(G)+k3*Iarc_voc/(k4*Ibf^7+k5*Ibf^6+k6*Ibf^5+k7*Ibf^4+k8*Ibf^3+k9*Ibf^2+k10*Ibf)
84         +k11*log10(Ibf) +k12*log10(D)+k13*log10(Iarc)+log10(1/CF));
85     end

```

B.5 Função: *interboundary.m*

```

# Código
1 % Function: interboundary
2 % Reference: IEEE Std 1584™-2018 4.7
3 % Input Data: EC: Electrode Configuration (VCB=1, VCBB=2, HCB=3, VOA=4, HOA=5)
4 % G: Gap [mm]
5 % Iarc_voc: Arcing Current at Voc [kA]
6 % Ibf: Bolted Fault Current [kA]
7 % Iarc: Arcing Current for V <= 600 V [kA]
8 % CF: Enclosure Size Correction Factor
9 % T: Arc Duration [ms]
10 % Voc: Open Circuit Voltage [V]
11 % Output Data: AFB: Arc-Flash Boundary at Voc [mm]
12 % Author: Edson Fernando Machado Sato
13
14 function [AFB] = interboundary(EC,G,Iarc_voc,Ibf,Iarc,CF,T,Voc)
15 if Voc < 600 % Table 3 - Coefficients for Equation (3), Equation (6), Equation (7) and Equation (10) - 600 V
16 table = [
17 7.53364E-01 5.66000E-01 1.75264E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 -4.78300E-09 1.96200E-06
18 -2.29000E-04 3.14100E-03 1.09200E+00 0.00000E+00 -1.59800E+00 9.57000E-01 % VCB
19 3.06846E+00 2.60000E-01 -9.81070E-02 0.00000E+00 0.00000E+00 -5.76700E-09 2.52400E-06
20 -3.40000E-04 1.18700E-02 1.01300E+00 -6.00000E-02 -1.80900E+00 1.19000E+00 % VCBB
21 4.07375E+00 3.44000E-01 -3.70259E-01 0.00000E+00 0.00000E+00 -5.38200E-09 2.31600E-06
22 -3.02000E-04 9.10000E-03 9.72500E-01 0.00000E+00 -2.03000E+00 1.03600E+00 % HCB
23 6.79294E-01 7.46000E-01 1.22264E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 -4.78300E-09 1.96200E-06
24 -2.29000E-04 3.14100E-03 1.09200E+00 0.00000E+00 -1.59800E+00 9.97000E-01 % VOA
25 3.47042E+00 4.65000E-01 -2.61863E-01 0.00000E+00 0.00000E+00 -3.89500E-09 1.64100E-06
26 -1.97000E-04 2.61500E-03 1.10000E+00 0.00000E+00 -1.99000E+00 1.04000E+00 ]; % HOA
27 elseif Voc == 600 % Table 3 - Coefficients for Equation (3), Equation (6), Equation (7) and Equation (10) - 600 V
28 table = [
29 7.53364E-01 5.66000E-01 1.75264E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 -4.78300E-09 1.96200E-06
30 -2.29000E-04 3.14100E-03 1.09200E+00 0.00000E+00 -1.59800E+00 9.57000E-01 % VCB
31 3.06846E+00 2.60000E-01 -9.81070E-02 0.00000E+00 0.00000E+00 -5.76700E-09 2.52400E-06
32 -3.40000E-04 1.18700E-02 1.01300E+00 -6.00000E-02 -1.80900E+00 1.19000E+00 % VCBB
33 4.07375E+00 3.44000E-01 -3.70259E-01 0.00000E+00 0.00000E+00 -5.38200E-09 2.31600E-06
34 -3.02000E-04 9.10000E-03 9.72500E-01 0.00000E+00 -2.03000E+00 1.03600E+00 % HCB
35 6.79294E-01 7.46000E-01 1.22264E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 -4.78300E-09 1.96200E-06
36 -2.29000E-04 3.14100E-03 1.09200E+00 0.00000E+00 -1.59800E+00 9.97000E-01 % VOA
37 3.47042E+00 4.65000E-01 -2.61863E-01 0.00000E+00 0.00000E+00 -3.89500E-09 1.64100E-06
38 -1.97000E-04 2.61500E-03 1.10000E+00 0.00000E+00 -1.99000E+00 1.04000E+00 ]; % HOA
39 Iarc = Iarc_voc;
40 elseif Voc == 2700 % Table 4 - Coefficients for Equation (4) and Equation (8) - 2700 V
41 table = [
42 2.40021E+00 1.65000E-01 3.54202E-01 -1.55700E-12 4.55600E-10 -4.18600E-08 8.34600E-07
43 5.48200E-05 -3.19100E-03 9.72900E-01 0.00000E+00 -1.56900E+00 9.77800E-01 % VCB
44 3.87059E+00 1.85000E-01 -7.36618E-01 0.00000E+00 -9.20400E-11 2.90100E-08 -3.26200E-06
45 1.56900E-04 -4.00300E-03 9.82500E-01 0.00000E+00 -1.74200E+00 1.09000E+00 % VCBB
46 3.48639E+00 1.77000E-01 -1.93101E-01 0.00000E+00 0.00000E+00 4.85900E-10 -1.81400E-07
47 -9.12800E-06 -7.00000E-04 9.88100E-01 2.70000E-02 -1.72300E+00 1.05500E+00 % HCB
48 3.88072E+00 1.05000E-01 -1.90603E+00 -1.55700E-12 4.55600E-10 -4.18600E-08 8.34600E-07
49 5.48200E-05 -3.19100E-03 9.72900E-01 0.00000E+00 -1.51500E+00 1.11500E+00 % VOA
50 3.61627E+00 1.49000E-01 -7.61561E-01 0.00000E+00 0.00000E+00 7.85900E-10 -1.91400E-07
51 -9.12800E-06 -7.00000E-04 9.98100E-01 0.00000E+00 -1.63900E+00 1.07800E+00 ]; % HOA
52 Iarc = Iarc_voc;
53 elseif Voc == 14300 % Table 5 - Coefficients for Equation (5) and Equation (9) - 14300 V
54 table = [
55 3.82592E+00 1.10000E-01 -9.99749E-01 -1.55700E-12 4.55600E-10 -4.18600E-08 8.34600E-07
56 5.48200E-05 -3.19100E-03 9.72900E-01 0.00000E+00 -1.56800E+00 9.90000E-01 % VCB
57 3.64431E+00 2.15000E-01 -5.85522E-01 0.00000E+00 -9.20400E-11 2.90100E-08 -3.26200E-06
58 1.56900E-04 -4.00300E-03 9.82500E-01 0.00000E+00 -1.67700E+00 1.06000E+00 % VCBB
59 3.04452E+00 1.25000E-01 2.45106E-01 0.00000E+00 -5.04300E-11 2.23300E-08 -3.04600E-06
60 1.16000E-04 -1.14500E-03 9.83900E-01 0.00000E+00 -1.65500E+00 1.08400E+00 % HCB
61 3.40545E+00 1.20000E-01 -9.32450E-01 -1.55700E-12 4.55600E-10 -4.18600E-08 8.34600E-07
62 5.48200E-05 -3.19100E-03 9.72900E-01 0.00000E+00 -1.53400E+00 9.79000E-01 % VOA
63 2.04049E+00 1.77000E-01 1.00509E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 7.85900E-10 -1.91400E-07
64 -9.12800E-06 -7.00000E-04 9.98100E-01 -5.00000E-02 -1.63300E+00 1.15100E+00 ]; % HOA
65 Iarc = Iarc_voc;
66 else
67 disp('Error!')
68 end
69 k1 = table(EC,1);
70 k2 = table(EC,2);
71 k3 = table(EC,3);
72 k4 = table(EC,4);
73 k5 = table(EC,5);
74 k6 = table(EC,6);
75 k7 = table(EC,7);
76 k8 = table(EC,8);
77 k9 = table(EC,9);
78 k10 = table(EC,10);
79 k11 = table(EC,11);
80 k12 = table(EC,12);
81 k13 = table(EC,13);
82 AFB = 10^((k1+k2*log10(G)+k3*Iarc_voc/(k4*Ibf^7+k5*Ibf^6+k6*Ibf^5+k7*Ibf^4+k8*Ibf^3+k9*Ibf^2+k10*Ibf)+k11*log10(Ibf)
83 +k13*log10(Iarc) +log10(1/CF)-log10(20/T))/-k12);
84 end

```

B.6 Função: *finalvalues.m*

```
# Código e8

---

1 % Function: finalvalues  
2 % Reference: IEEE Std 1584™-2018 4.9  
3 % Input Data: X600: Value for Voc = 600 V  
4 % X2700: Value for Voc = 2700 V  
5 % X14300: Value for Voc = 14300 V  
6 % Voc: Open Circuit Voltage [kV]  
7 % Output Data: X: Final Value  
8 % Author: Edson Fernando Machado Sato  
9  
10 function [X] = finalvalues(X600,X2700,X14300,Voc)  
11 X1 = (X2700-X600)/2.1*(Voc-2.7)+X2700;  
12 X2 = (X14300-X2700)/11.6*(Voc-14.3)+X14300;  
13 X3 = (X1*(2.7-Voc))/2.1+(X2*(Voc-0.6))/2.1;  
14 if (Voc > 0.6) && (Voc <= 2.7)  
15 X = X3;  
16 elseif (Voc > 2.7)  
17 X = X2;  
18 else  
19 disp('Error!')  
20 end  
21 end
```

B.7 Função: *enclosurecf.m*

```

# Código
1 % Function: enclosurecf
2 % Reference: IEEE Std 1584™-2018 4.8
3 % Input Data: EC: Electrode Configuration (VCB=1, VCBB=2, HCB=3)
4 % Voc: Open Circuit Voltage [kV]
5 % Hgt: Actual Enclosure Height [mm]
6 % Wth: Actual Enclosure Width [mm]
7 % Dth: Actual Enclosure Depth [mm]
8 % Output Data: CF: Enclosure Size Correction Factor
9 % Author: Edson Fernando Machado Sato
10
11 function [CF] = enclosurecf(EC,Voc,Hgt,Wth,Dth)
12 % Table 7 - Coefficients for Equation (14) - TYPICAL
13 table7t = [
14 %b1 b2 b3
15 -3.0200E-04 3.4410E-02 4.3250E-01 % Typical VCB
16 -2.9760E-04 3.2000E-02 4.7900E-01 % Typical VCBB
17 -1.9230E-04 1.9350E-02 6.8990E-01 ]; % Typical HCB
18
19 % Table 7 - Coefficients for Equation (15) - SHALLOW
20 table7s = [
21 %b1 b2 b3
22 2.2220E-03 -2.5560E-02 6.2220E-01 % Shallow VCB
23 -2.7780E-03 1.1940E-01 -2.7780E-01 % Shallow VCBB
24 -5.5560E-04 3.7220E-02 4.7780E-01 ]; % Shallow HCB
25
26 if (Voc < 0.6) && (Hgt < 508) && (Wth < 508) && (Dth <= 203.2)
27 EnclosureType = 2; % Shallow
28 else
29 EnclosureType = 1; % Typical
30 end
31 if EC == 1
32 A = 4;
33 B = 20;
34 elseif EC == 2
35 A = 10;
36 B = 24;
37 elseif EC == 3
38 A = 10;
39 B = 22;
40 else
41 A = 0;
42 B = 0;
43 end
44 if Wth < 508
45 if EnclosureType == 1
46 Width1 = 20;
47 else
48 Width1 = 0.03937*Wth;
49 end
50 elseif Wth <= 660.4
51 Width1 = 0.03937*Wth;
52 elseif Wth <= 1244.6
53 Width1 = (660.4+(Wth-660.4)*(Voc+A)/B)*(1/25.4);
54 else
55 Width1 = (660.4+(1244.6-660.4)*(Voc+A)/B)*(1/25.4);
56 end
57 if Hgt < 508
58 if EnclosureType == 1
59 Height1 = 20;
60 else
61 Height1 = 0.03937*Hgt;
62 end
63 elseif Hgt <= 660.4
64 Height1 = 0.03937*Hgt;
65 elseif Hgt <= 1244.6
66 if EC == 1
67 Height1 = 0.03937*Hgt;
68 else
69 Height1 = (660.4+(Hgt-660.4)*(Voc+A)/B)*(1/25.4);
70 end
71 else
72 if EC == 1
73 Height1 = 49;
74 else
75 Height1 = (660.4+(1244.6-660.4)*(Voc+A)/B)*(1/25.4);
76 end
77 end
78 EES = (Height1+Width1)/2;
79 if EnclosureType == 1
80 CF = table7t(EC,1)*EES^2+table7t(EC,2)*EES+table7t(EC,3);
81 else
82 CF = 1/(table7s(EC,1)*EES^2+table7s(EC,2)*EES+table7s(EC,3));
83 end
84 end

```

B.8 Função: *currentvarcf.m*

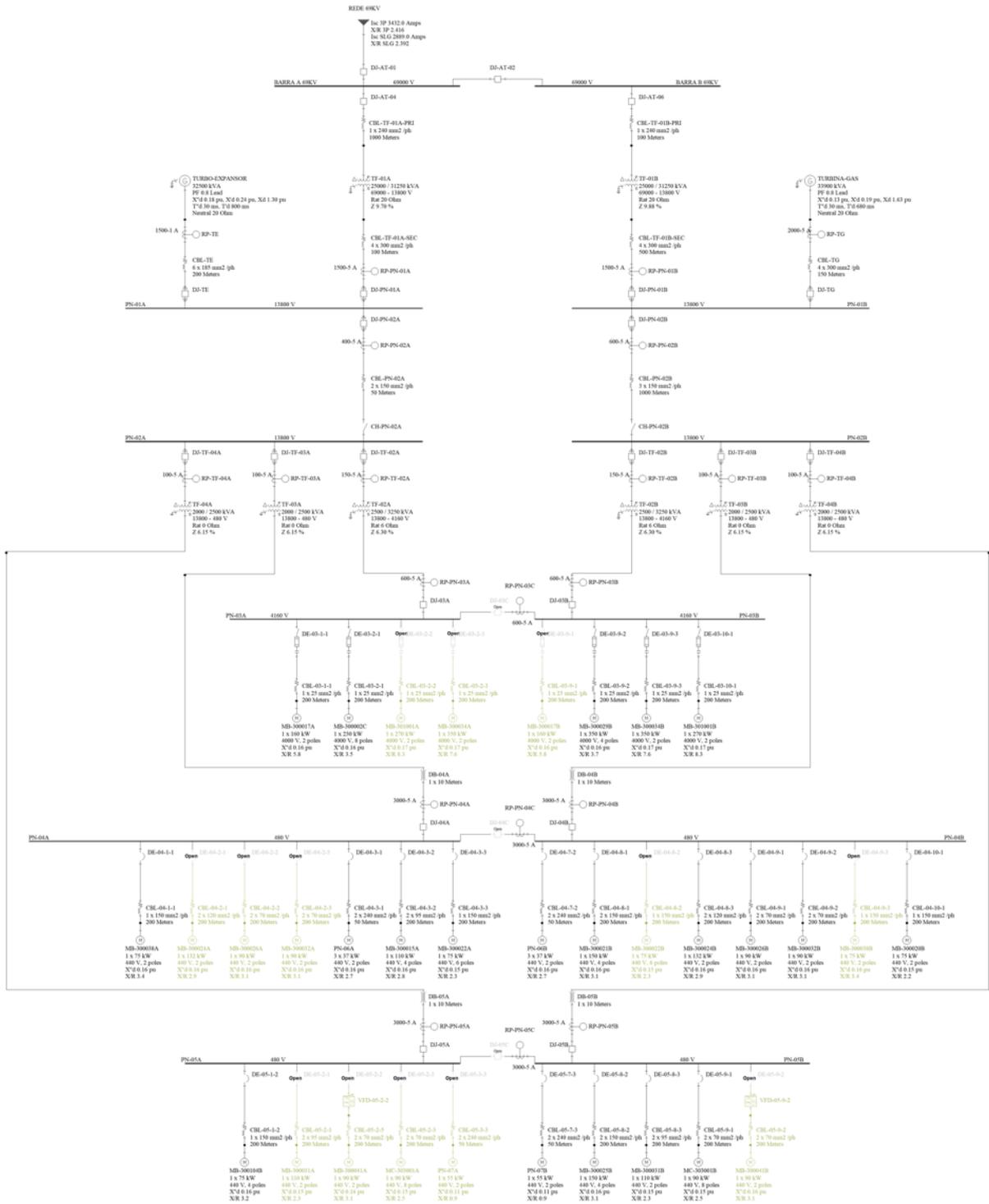
```

# Código
1 % Function: currentvarcf
2 % Reference: IEEE Std 1584™-2018 4.5
3 % Input Data: EC: Electrode Configuration (VCB=1, VCBB=2, HCB=3, VOA=4, HOA=5)
4 % Voc: Open Circuit Voltage [kV]
5 % Output Data: VarCf: Arcing Current Variation Correction Factor
6 % Author: Edson Fernando Machado Sato
7
8 function [VarCf] = currentvarcf(EC,Voc)
9 % Table 2 - Coefficients for Equation (2)
10 table2 = [
11 %k1 k2 k3 k4 k5 k6 k7
12 0.00000E+00 -1.42690E-06 8.31370E-05 -1.93820E-03 2.23660E-02 -1.26450E-01 3.02260E-01 % VCB
13 1.13800E-06 -6.02870E-05 1.27580E-03 -1.37780E-02 8.02170E-02 -2.40660E-01 3.35240E-01 % VCBB
14 0.00000E+00 -3.09700E-06 1.64050E-04 -3.36090E-03 3.33080E-02 -1.61820E-01 3.46270E-01 % HCB
15 9.56060E-07 -5.15430E-05 1.11610E-03 -1.24200E-02 7.51250E-02 -2.35840E-01 3.36960E-01 % VOA
16 0.00000E+00 -3.15550E-06 1.68200E-04 -3.46070E-03 3.41240E-02 -1.59900E-01 3.46290E-01 ]; % HOA
17 k1 = table2(EC,1);
18 k2 = table2(EC,2);
19 k3 = table2(EC,3);
20 k4 = table2(EC,4);
21 k5 = table2(EC,5);
22 k6 = table2(EC,6);
23 k7 = table2(EC,7);
24 VarCf = k1*Voc^6+k2*Voc^5+k3*Voc^4+k4*Voc^3+k5*Voc^2+k6*Voc+k7;
25 end

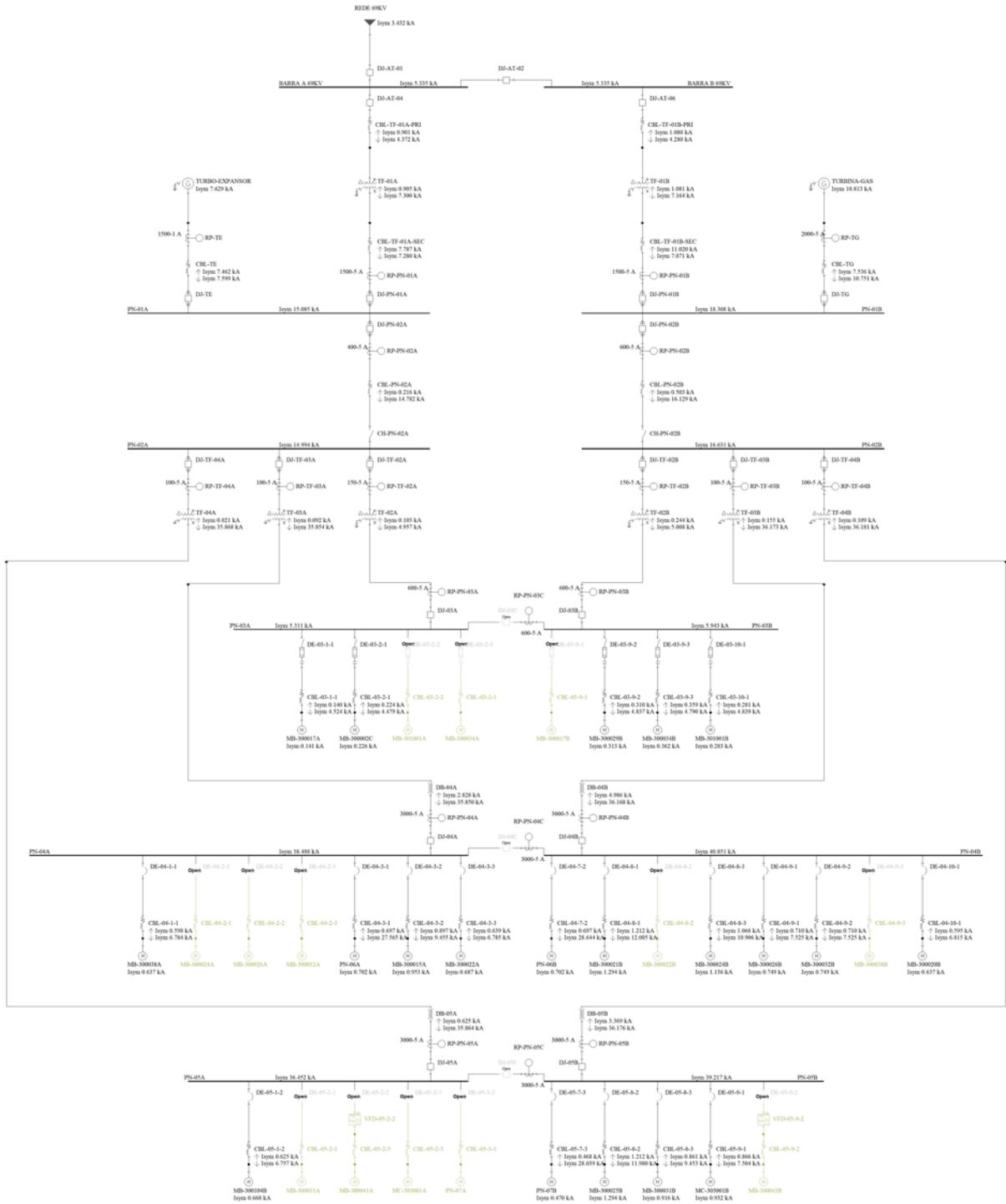
```

ANEXO C – Dados do Estudo de Caso 2

C.1 Especificação dos equipamentos (diagrama unifilar)

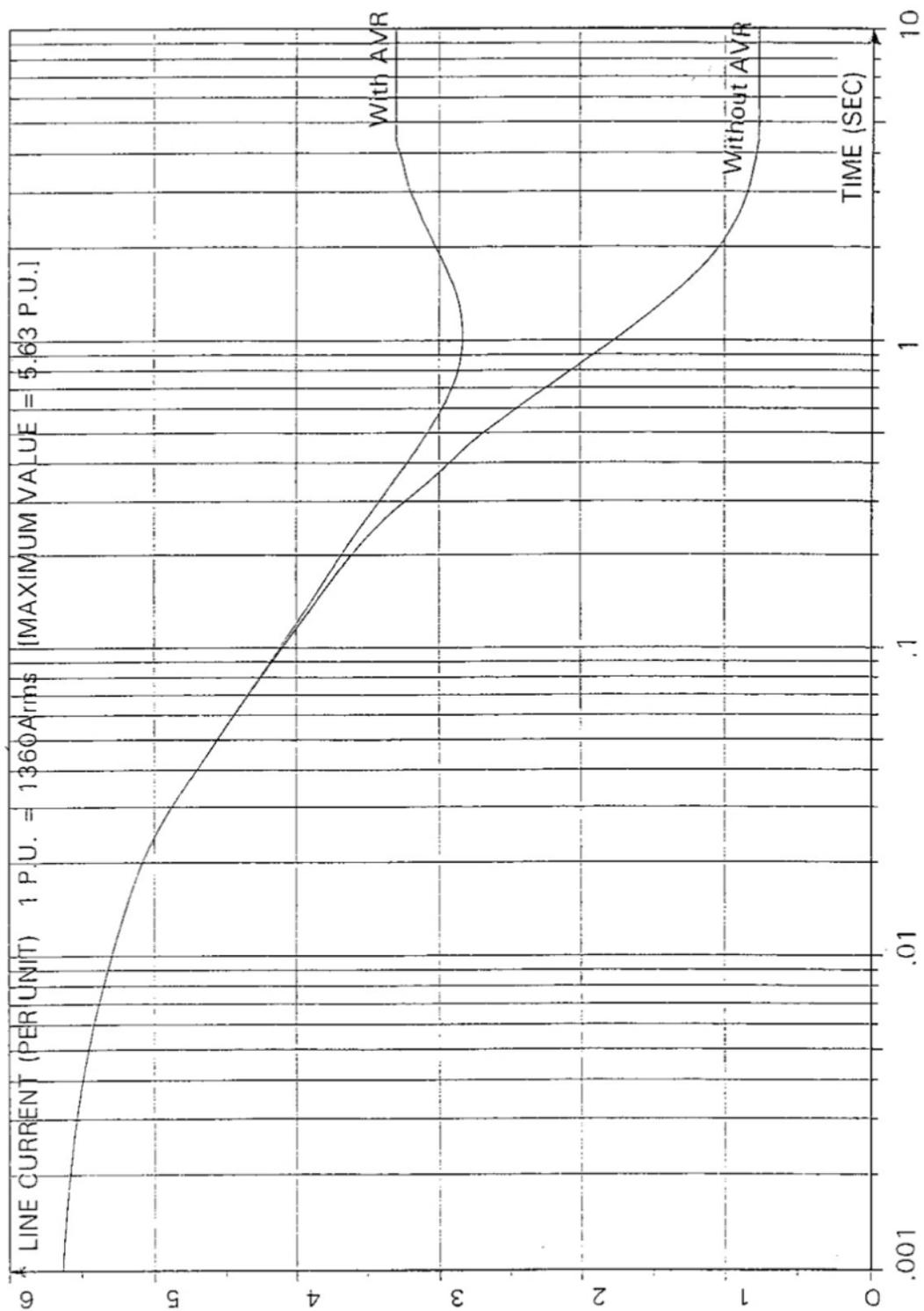


C.2 Estudio de corto-circuito (diagrama unifilar)



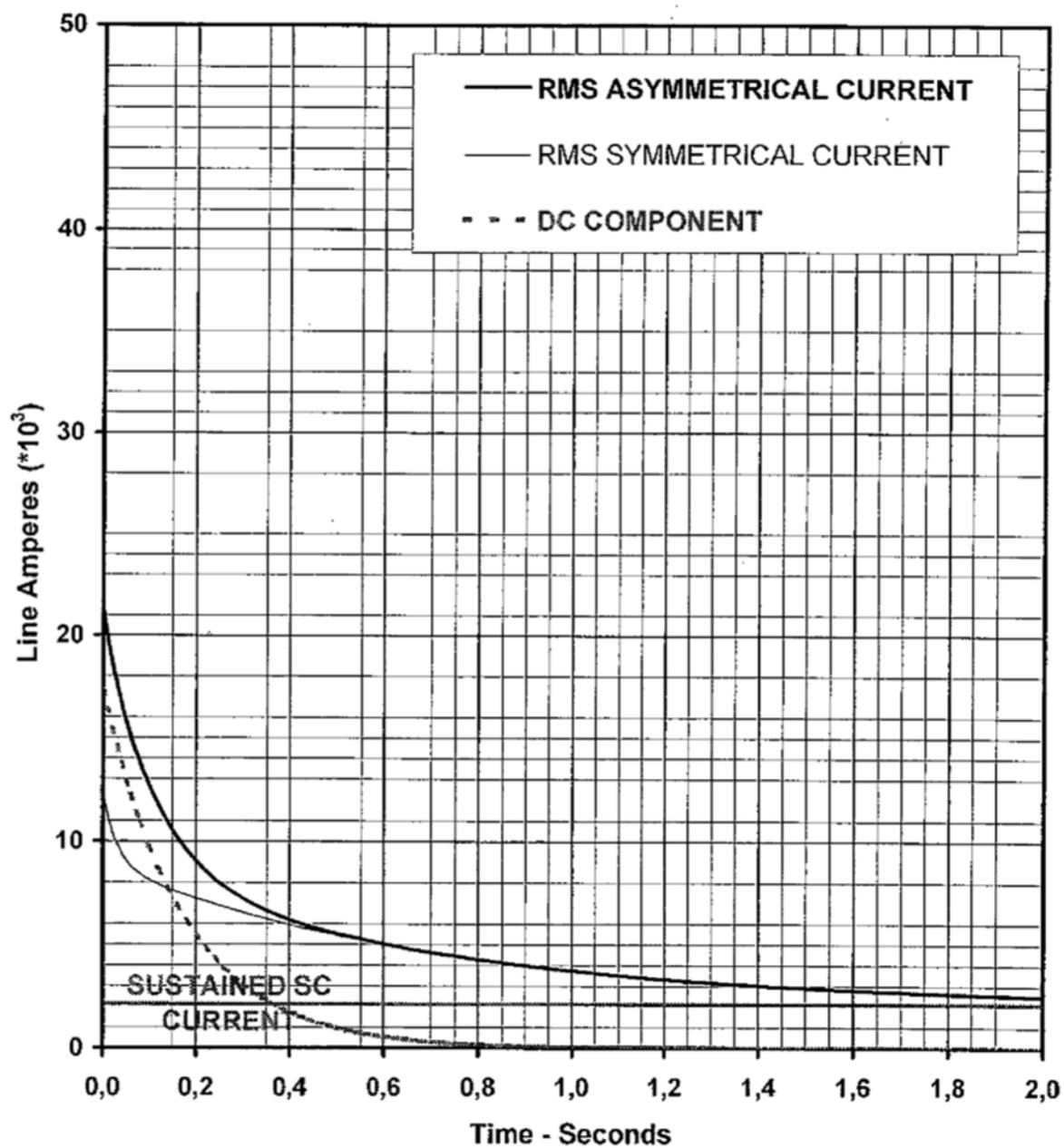
C.3 Curva de decremento CA do TURBO-EXPANSOR

THREE-PHASE SHORT CIRCUIT FROM RATED VOLTAGE ON OPEN CIRCUIT
G205E4 13800V 60HZ 32500KVA 0.8PF 1360A



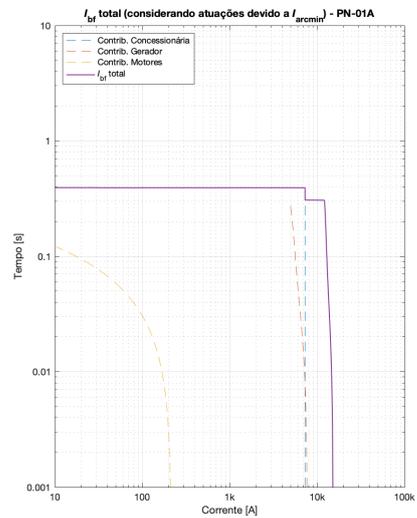
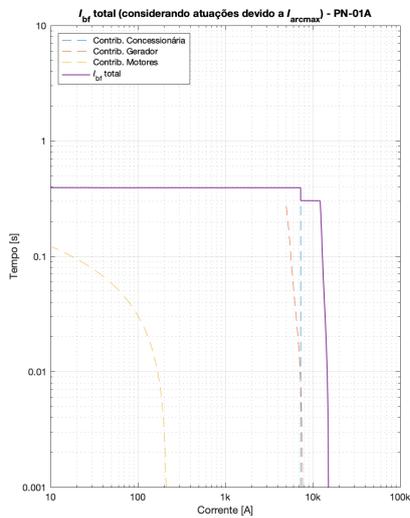
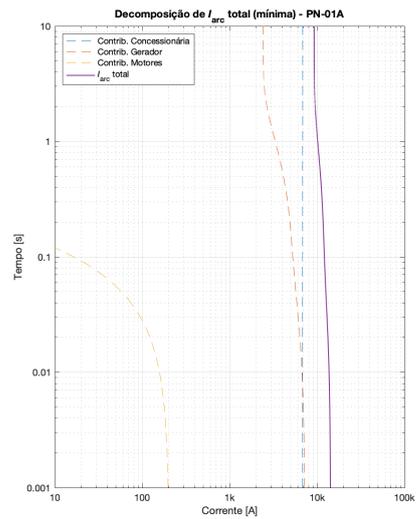
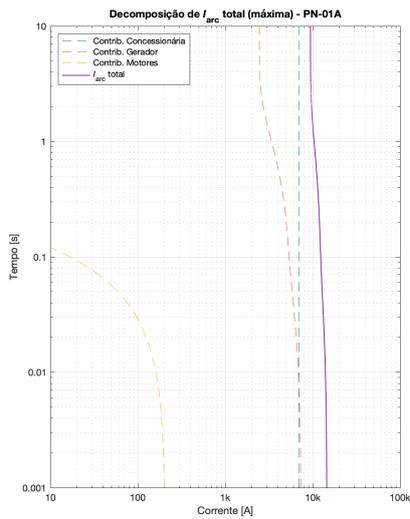
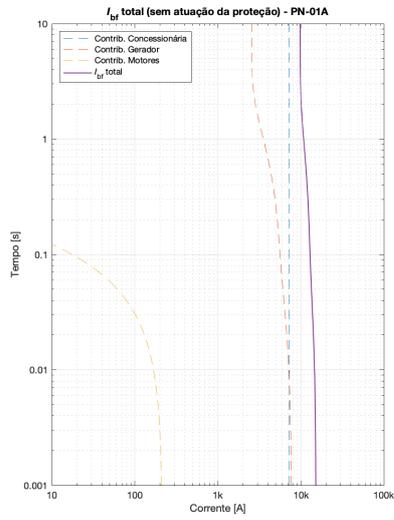
C.4 Curva de decremento CA da TURBINA-GAS

$S_N =$	33,900 MVA	P.F. =	0,80	$T_{\text{Cold Air}} =$	47 °C
$U_N =$	13,8 kV	$f_N =$	60 Hz		
$I_N =$	1,418 kA	$n_N =$	3600 rpm		

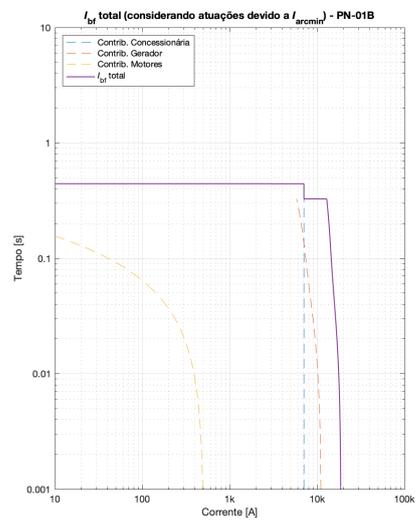
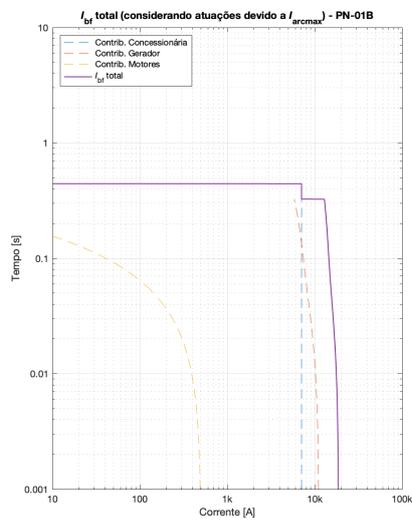
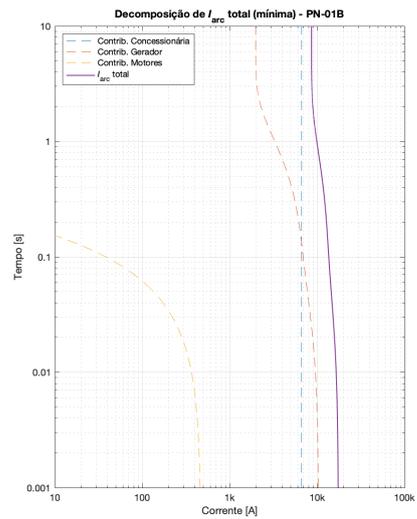
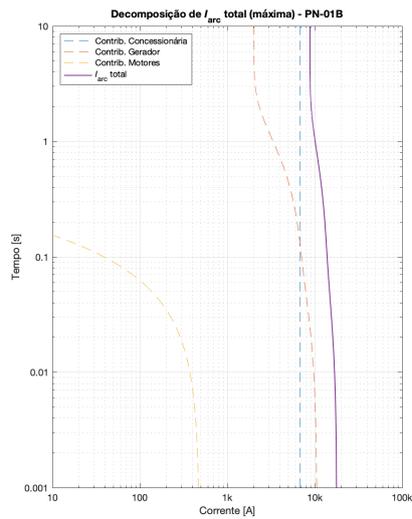
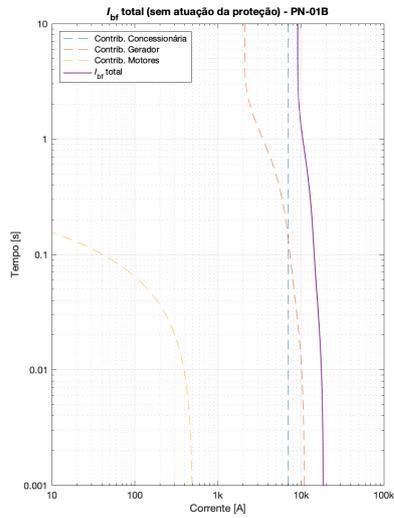


Values based on <100% load> and related terminal voltage = 1,05 p.u. .

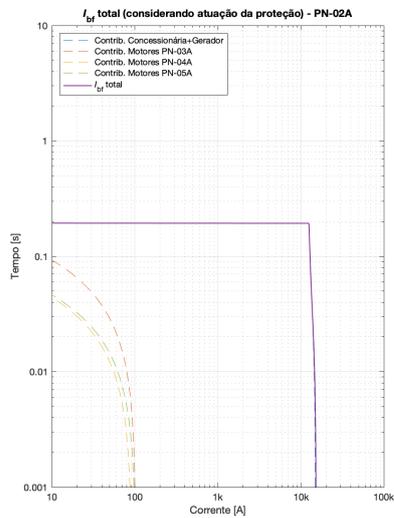
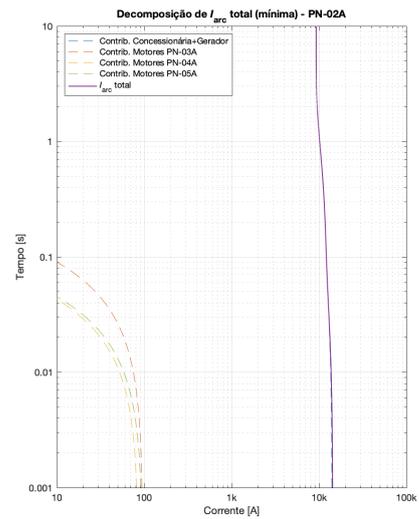
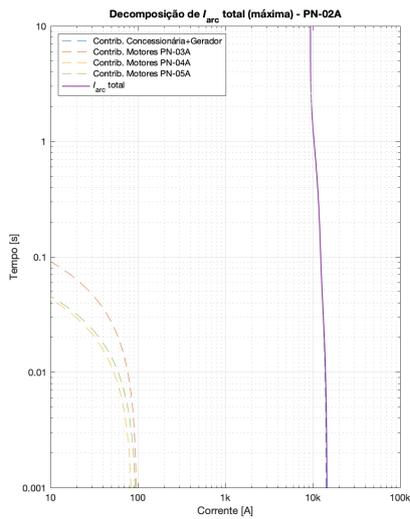
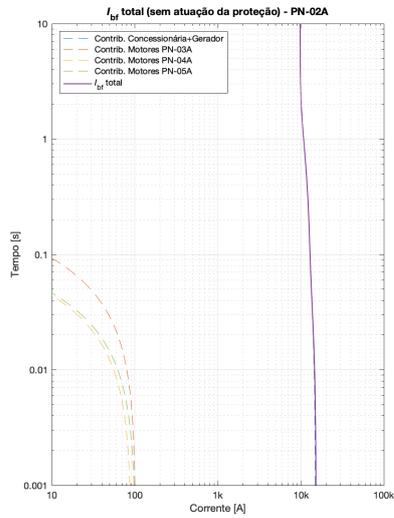
C.5 PN-01A: Curvas de I_{bf} e I_{arc}



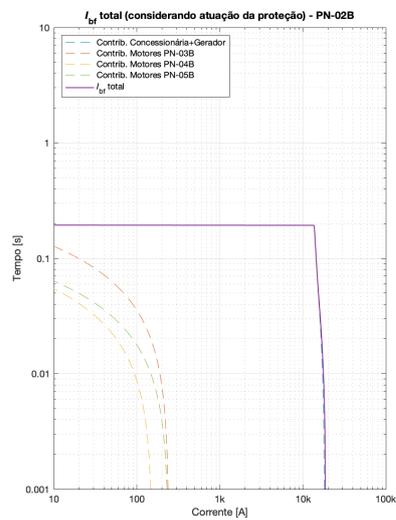
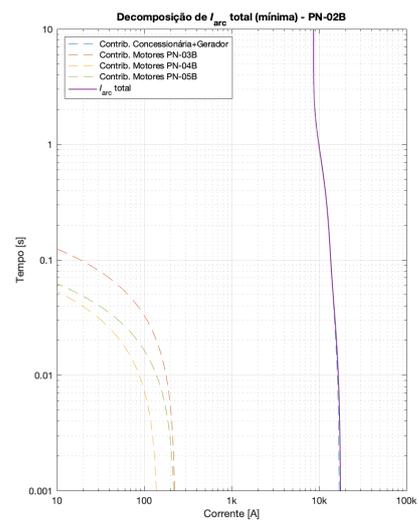
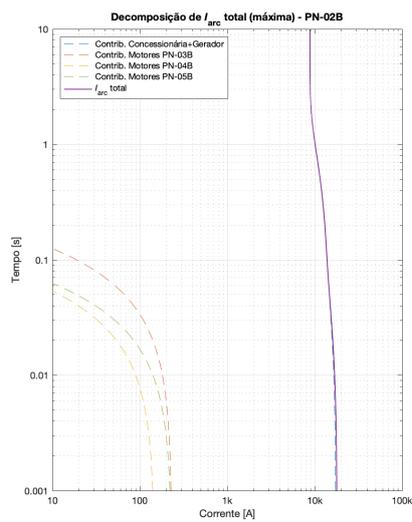
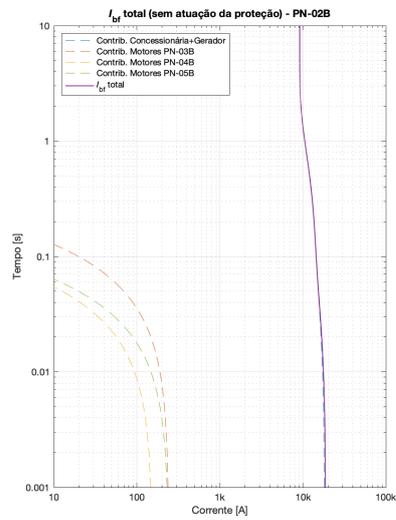
C.6 PN-01B: Curvas de I_{bf} e I_{arc}



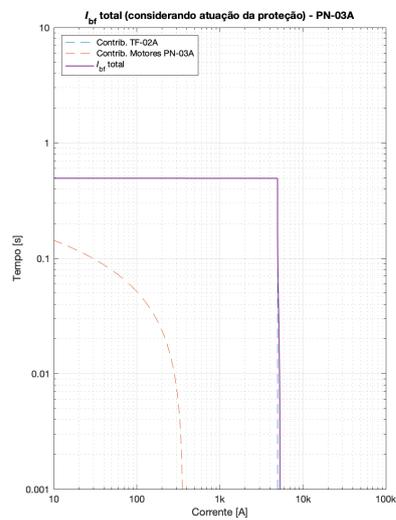
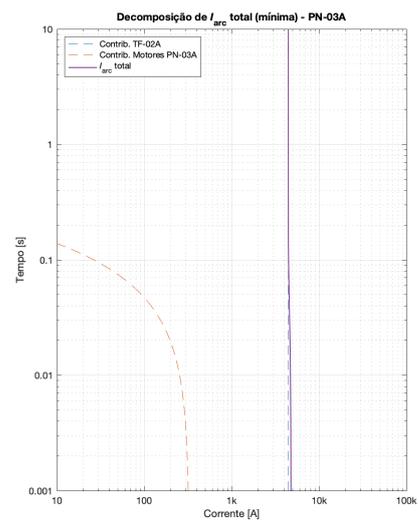
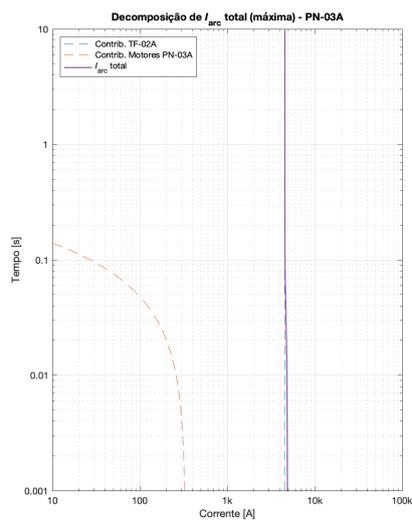
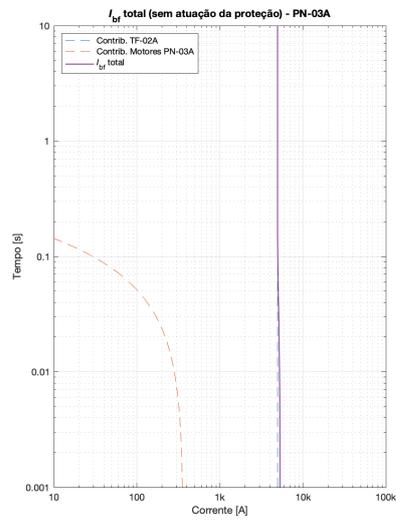
C.7 PN-02A: Curvas de I_{bf} e I_{arc}



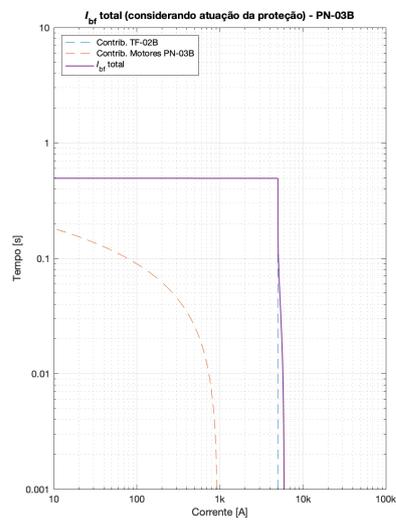
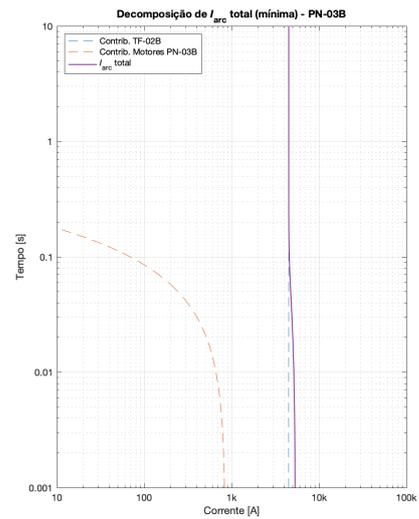
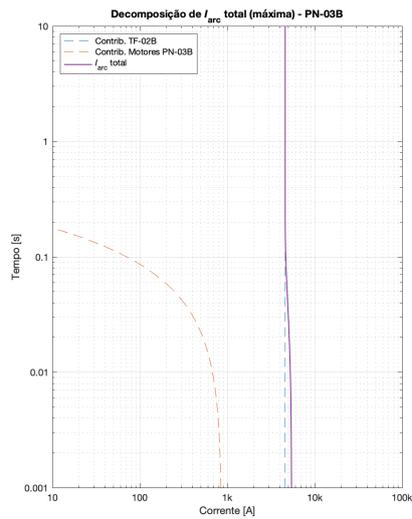
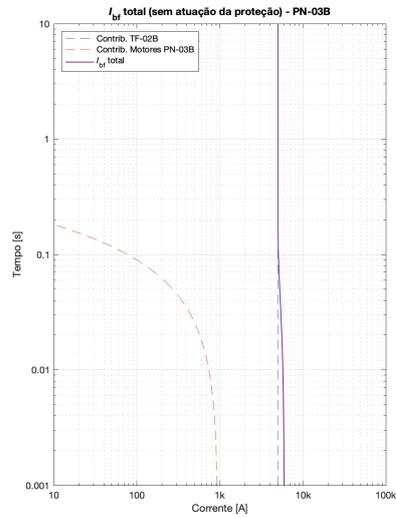
C.8 PN-02B: Curvas de I_{bf} e I_{arc}



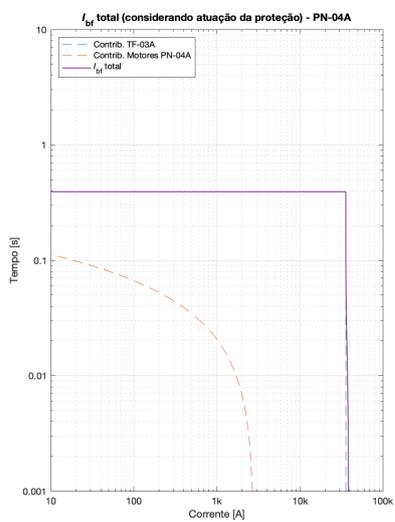
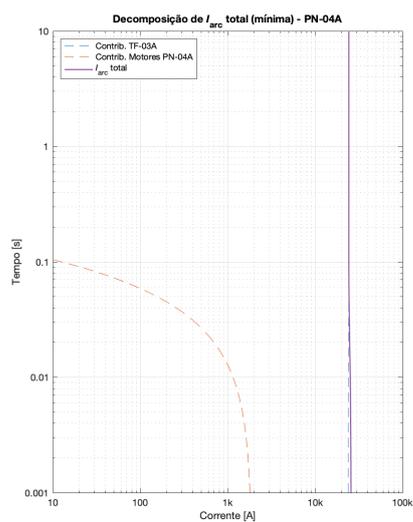
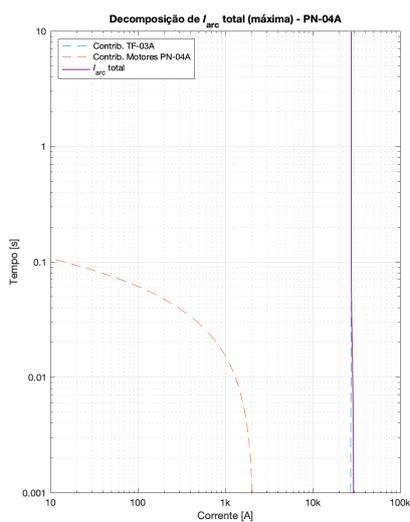
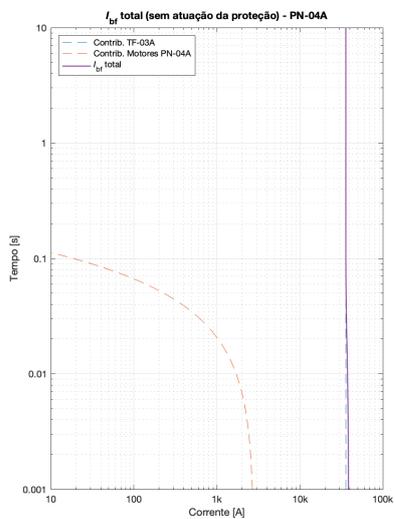
C.9 PN-03A: Curvas de I_{bf} e I_{arc}



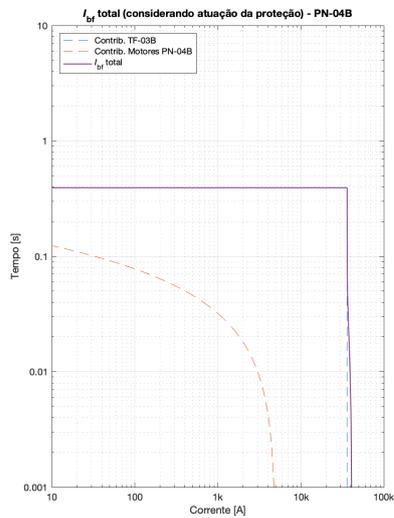
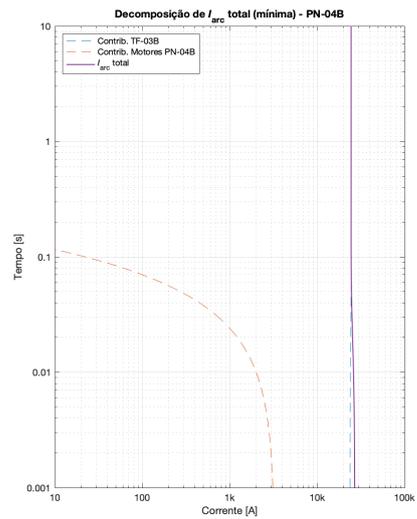
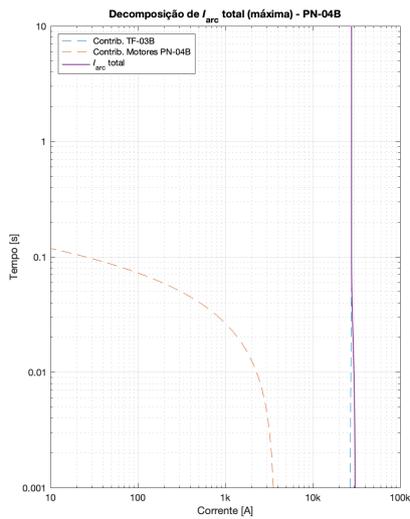
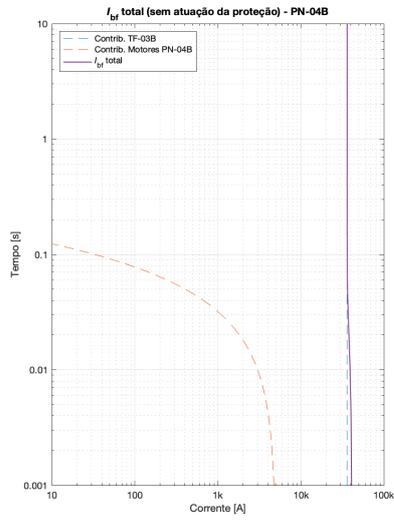
C.10 PN-03B: Curvas de I_{bf} e I_{arc}



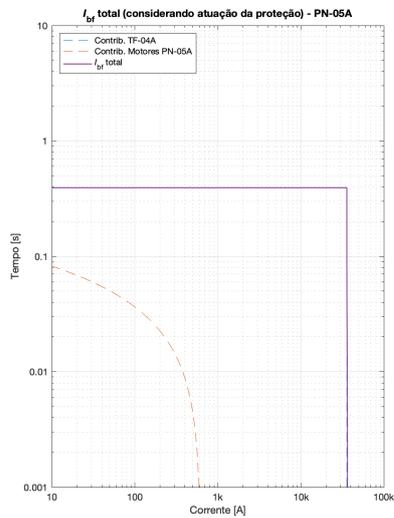
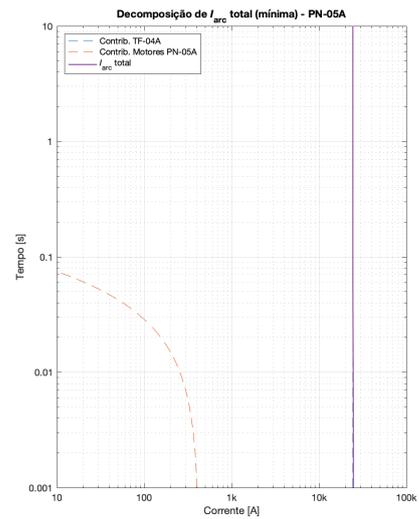
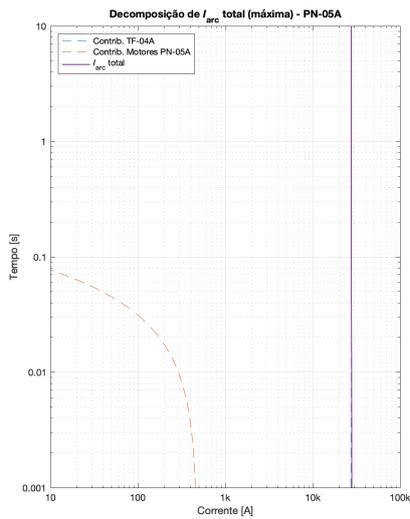
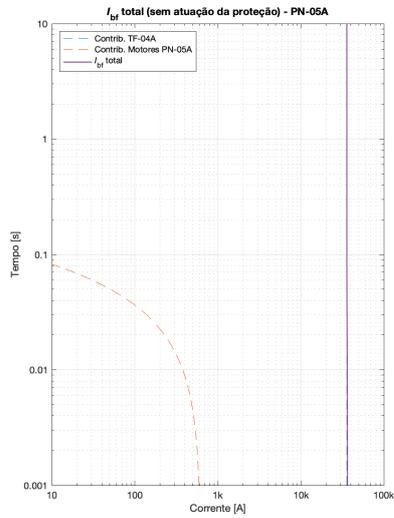
C.11 PN-04A: Curvas de I_{bf} e I_{arc}



C.12 PN-04B: Curvas de I_{bf} e I_{arc}



C.13 PN-05A: Curvas de I_{bf} e I_{arc}



C.14 PN-05B: Curvas de I_{bf} e I_{arc}

