

**Universidade Federal de Minas Gerais**

**Escola de Engenharia**

**Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica**

**PROTEÇÃO ELÉTRICA EM SUBESTAÇÕES: UMA ABORDAGEM  
SOBRE A ENERGIA INCIDENTE**

FILIPE BARCELOS RESENDE

Dissertação de Mestrado submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Orientador: Clever Sebastião Pereira Filho

Belo Horizonte - MG

Dezembro de 2016

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO Nº 958

**PROTEÇÃO ELÉTRICA EM SUBESTAÇÕES: UMA ABORDAGEM SOBRE A  
ENERGIA INCIDENTE**

**FILIFE BARCELOS RESENDE**

DATA DA DEFESA: 21/12/2016


**"Proteção Elétrica em Subestações: Uma Abordagem Sobre a Energia Incidente"**

**FILIFE BARCELOS RESENDE**

Dissertação de Mestrado submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

Aprovada em 21 de dezembro de 2016.

Por:

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Cleyer Sebastião Pereira Filho  
DEE (UFMG) - Orientador

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. José Luiz Silvino  
DELT/UFMG (UFMG)

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Eduardo Gonzaga da Silveira  
Depto. Engenharia Elétrica (CEFET/MG)

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

**PROTEÇÃO ELÉTRICA EM SUBESTAÇÕES:  
UMA ABORDAGEM SOBRE A ENERGIA  
INCIDENTE**

**RESENDE, Filipe Barcelos**

Proteção Elétrica em Subestações: uma Abordagem sobre a Energia Incidente

Belo Horizonte, Dezembro/2016. 101 páginas.

Trabalho apresentado ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da  
Universidade Federal de Minas Gerais.

*"A imaginação é mais importante que a ciência, porque a ciência é limitada, ao passo que a imaginação abrange o mundo inteiro"*

**Albert Einstein**

# Agradecimento

Agradeço em primeiro lugar à Deus por me guiar até aqui e me permitir vencer mais essa etapa.

Agradeço à minha família pelo apoio, em especial à minha mãe por todo o incentivo desde o começo dessa caminhada.

Agradeço ao meu orientador Clever Pereira pela essencial atenção que me dispensou até aqui, pelo acolhimento e oportunidade de seguir no curso com seu apoio.

Um agradecimento especial ao amigo Henrique Fantoni da empresa SM&A pelos muitos ensinamentos e pela parceria. Um agradecimento também a Thaísa Loback que me incentivou a iniciar o curso de mestrado na UFMG.

Um agradecimento especial à Maiza Mafra de Souza pelo apoio, companheirismo e pela indispensável colaboração técnica, sem a qual seria difícil a conclusão desse trabalho.

Agradeço também a empresa VALE, onde adquiri grande parte do conhecimento necessário para elaborar essa dissertação.

Enfim, um agradecimento a todos que contribuíram para que esse trabalho chegasse ao final.

# Resumo

RESENDE, Filipe Barcelos. **Proteção Elétrica em Subestações: uma Abordagem sobre a Energia Incidente**. 101fl. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte/MG; 2016.

As boas práticas de saúde e segurança preconizam a intervenção em instalações elétricas desenergizadas sempre como primeira e melhor opção para os trabalhadores. Contudo, não é possível atender essa premissa para todo o leque de atividades existentes, sob o risco de não atender a disponibilidade física necessária à operação exigida por uma dada instalação. Dessa forma, as intervenções em instalações energizadas devem ser sempre amparadas por medidas de controle eficazes para mitigar os riscos existentes durante as atividades. Um dos principais riscos associados às atividades envolvendo eletricidade é a energia incidente resultante de um arco elétrico. O objetivo desse trabalho é descrever o fenômeno do arco, apresentar a modelagem matemática para o cálculo da energia incidente e aplicar a metodologia para determinar os níveis de energia incidente de uma instalação real. O trabalho apresenta também as principais formas de mitigação dos riscos associados à energia incidente e a necessidade da correta especificação das vestimentas antichama para a proteção dos efeitos térmicos.

**Palavras-chave:** arco elétrico, energia incidente, curto-circuito, queimaduras, distância de segurança.

# Abstract

Good health and safety practices advocate intervention in de-energized electrical installations as the first and best option for workers. However, it is not possible to meet this premise for the full range of existing activities, at the risk of not meeting the physical availability required for the operation required by a given facility. In this way, interventions in energized installations must always be supported by effective control measures to mitigate the risks that exist during the activities. One of the main risks associated with electricity activities is the incident energy resulting from an electric arc. The objective of this work is to describe the phenomenon of the arc, to present the mathematical modeling for the calculation of the incident energy and to apply the methodology to determine the incident energy levels of a real installation. The work also presents the main ways of mitigating the risks associated with incident energy and the need for the correct specification of the fire retardant clothing to protect of the thermal effects.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Acidentes fatais nos EUA relacionados a eletricidade, 1992-2013 .....	1
Figura 1.2 – Relatório de Estatísticas de Acidentes do Setor Elétrico Brasileiro – 2013 .....	2
Figura 2.1 – Ilustração dos componentes do arco elétrico.....	6
Figura 2.2 – Calor transferido da fonte (arco elétrico) para um objeto a uma distância r .....	8
Figura 3.1 – Tolerância do tecido humano à elevação de temperatura em função do tempo .....	12
Figura 3.2 – Diagrama fasorial da tensão e corrente a medida que se varia Ra.....	12
Figura 3.3 – Teste em configuração aberta.....	14
Figura 3.4 – Teste em configuração fechada .....	14
Figura 3.5 – Energia Incidente para as configurações aberta e fechada em função da corrente de falta .....	15
Figura 3.6 – Energia do arco e energia incidente para um sistema trifásico em configuração aberta .....	16
Figura 3.7 – Variação da energia incidente com o GAP.....	22
Figura 3.8 – Fluxograma para o cálculo da energia incidente segundo IEEE-1584.....	24
Figura 3.9 – Modelo do arco elétrico pelo ArcPro .....	25
Figura 3.10 – Entrada de dados - Software ArcPro .....	25
Figura 4.1 – Regra dos Nove de Wallace – Percentual da superfície corporal para os membros do corpo .....	31
Figura 4.2 – Classificação das queimaduras de acordo com a profundidade.....	31
Figura 4.3 – Relação entre especificações e métodos de teste para equipamentos de proteção .....	33
Figura 4.4 – Referência de Stoll .....	34
Figura 4.5 – Exemplo de ensaio baseado na curva de Stoll.....	34
Figura 4.6 – Exemplo de ensaio de determinação de ATPV .....	35
Figura 4.7 – Categoria do EPI.....	36
Figura 4.8 – Identificação de nível de ATPV em vestimenta antichama.....	37
Figura 4.9 – Evento com ocorrência de arco elétrico .....	39
Figura 5.1 – Distância de segurança de arco e limites de aproximação.....	42
Figura 6.1 – Hierarquia das medidas de controle baseado na OHSAS 18001-2007.....	45
Figura 6.2 – Reatores de limitação .....	46
Figura 6.3 – Transformador de alta impedância.....	47
Figura 6.4 – Divisão de cargas em 2 transformadores.....	47
Figura 6.5 – Exemplo de descoordenação para redução de energia incidente .....	48
Figura 6.6 – Seletividade Lógica entre relés de sobrecorrente .....	49
Figura 6.7 – Curvas Relés A e B .....	49
Figura 6.8 – Circuito lógico típico para seletividade lógica .....	49
Figura 6.9 – Esquema de funcionamento da proteção .....	50
Figura 6.10 – Sensor Pontual.....	50
Figura 6.11 – Relé de Proteção.....	50
Figura 6.12 – Circuito lógico típico para proteção contra arco elétrico .....	51
Figura 6.13 – Zonas de proteção do relé – Arranjo típico .....	52
Figura 6.14 – Vista em corte de um painel elétrico .....	53
Figura 6.15 – Registro oscilográfico de um relé com detecção de arco voltaico.....	54
Figura 7.1 – Diagrama unifilar simplificado da instalação.....	56
Figura 7.2 – Perfil da corrente de curto-circuito segundo IEC-60909.....	59
Figura 7.3 – Saturação de um TC .....	65
Figura 7.4 – Coordenograma típico.....	67
Figura 7.5 – Redução dos níveis de energia incidente – valores $\leq 8\text{cal/cm}^2$ .....	71
Figura 7.6 – Coordenograma Barra B1 / SE B – Referência: 13800V .....	73
Figura 7.7 – Coordenograma Barra B2 / SE I – Referência: 480V .....	74
Figura 7.8 – Coordenograma Barra B3 / SE IT – Referência: 13800V .....	75
Figura 7.9 – Coordenograma Barra B4 / SE AR – Referência: 13800V .....	76
Figura 7.10 – Coordenograma Barra B5 / SE BF - Referência: 13800V.....	77

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Principais riscos: Comparação entre arco elétrico e fogo repentino .....	8
Tabela 3.1 – Potência do Arco x Distância.....	13
Tabela 3.2 – Limites de aplicação para o método de cálculo IEEE 1584 .....	18
Tabela 3.3 – Classes dos equipamentos e distâncias de trabalho .....	20
Tabela 3.4 – Tempos típicos de operação de disjuntores em 60Hz .....	20
Tabela 3.5 – Fator ‘x’ e GAP entre condutores para tipos de equipamentos e classes de tensão .....	21
Tabela 3.6 – Energia incidente para vários valores de corrente de falta .....	27
Tabela 3.7 – Quadro resumo dos métodos de cálculo .....	29
Tabela 3.8 – Limites de aplicação dos métodos .....	29
Tabela 4.1 – Normativos Internacionais .....	32
Tabela 4.2 – Taxa de mortalidade por faixa etária x percentual de queimaduras .....	38
Tabela 5.1 – Evolução no conhecimento do arco elétrico e métodos de gerenciamento de risco - .....	40
Tabela 7.1 – Cálculo da contribuição dos motores para a corrente de curto-circuito .....	58
Tabela 7.2 – Resultado para as barras com nível de energia incidente $\geq 8\text{cal/cm}^2$ .....	68
Tabela 7.3 – Recomendação para redução dos níveis de energia incidente críticos .....	71

## **LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas  
ANSI – American National Standards Institute  
ASTM – American Society for Testing and Materials  
ATPV – Arc Thermal Performance Value  
CCM – Centro de Comado de Motores  
CENELEC – Comité Européen de Normalisation Électrotechnique  
EBT – Energy Breakopen Threshold  
EPI – Equipamento de Proteção Individual  
EPC – Equipamento de Proteção Coletivo  
FR – Fire Resistant  
IEC – International Electrotechnical Commision  
IED – Intelligent Electronic Device  
IEEE – Institute of Electrical and Electronics Engineers  
MTE – Ministério do Trabalho e Emprego  
NBR – Norma Brasileira  
NEC – National Electrical Code  
NESC – National Electrical Safety Code  
NFPA – National Fire Protection Association  
NR – Norma Regulamentadora  
OSHA – Occupational Safety and Health Administration  
OHSAS – Occupational Health and Safety Assessment Services  
PTW – Power Tools for Windows  
RAVO – Resistor de Alto Valor Ôhmico  
SEP – Sistema Elétrico de Potência

# Sumário

<b>LISTA DE FIGURAS .....</b>	<b>IX</b>
<b>LISTA DE TABELAS.....</b>	<b>X</b>
<b>LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS .....</b>	<b>XI</b>
<b>1. CAPÍTULO 1.....</b>	<b>1</b>
<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>1</b>
1.1 RELEVÂNCIA.....	1
1.2 OBJETIVO .....	3
1.3 METODOLOGIA.....	3
1.4 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO .....	4
<b>2. CAPÍTULO 2.....</b>	<b>5</b>
<b>O FENÔMENO DO ARCO ELÉTRICO E A ENERGIA INCIDENTE .</b>	<b>5</b>
2.1 INTRODUÇÃO .....	5
2.2 O FENÔMENO DO ARCO ELÉTRICO.....	5
2.3 O ARCO ELÉTRICO COMO ELEMENTO DO CIRCUITO .....	6
2.4 ENERGIA INCIDENTE.....	7
2.5 OUTROS RISCOS ASSOCIADOS.....	9
2.6 CONCLUSÃO .....	9
<b>3. CAPÍTULO 3.....</b>	<b>11</b>
<b>METODOLOGIAS DE CÁLCULO DA ENERGIA INCIDENTE.....</b>	<b>11</b>
3.1 INTRODUÇÃO .....	11
3.2 MÉTODO DE RALPH LEE .....	11
3.3 MÉTODO DE DOUGHTY-NEAL.....	14
3.4 MÉTODO IEEE 1584.....	17
3.5 UTILIZAÇÃO DE SOFTWARES .....	25
3.6 CONCLUSÃO .....	28
<b>4. CAPÍTULO 4.....</b>	<b>30</b>
<b>VESTIMENTAS ANTICHAMA .....</b>	<b>30</b>
4.1 INTRODUÇÃO .....	30
4.2 TOLERÂNCIA DO TECIDO HUMANO ÀS QUEIMADURAS.....	30
4.3 FABRICAÇÃO DE VESTIMENTAS.....	32
4.4 ESPECIFICAÇÃO DE VESTIMENTAS.....	36
4.5 CONCLUSÃO .....	39

<b>5. CAPÍTULO 5</b> .....	<b>40</b>
<b>REGULAMENTAÇÃO</b> .....	<b>40</b>
5.1 INTRODUÇÃO .....	40
5.2 NORMAS INTERNACIONAIS .....	40
5.3 NORMAS NACIONAIS .....	41
5.4 CONCLUSÃO .....	44
<b>6. CAPÍTULO 6</b> .....	<b>45</b>
<b>FORMAS DE MITIGAÇÃO DOS NÍVEIS DE ENERGIA INCIDENTE</b> .....	<b>45</b>
6.1 INTRODUÇÃO .....	45
6.2 REDUÇÃO DOS NÍVEIS DE CURTO-CIRCUITO .....	46
6.3 REDUÇÃO DOS TEMPOS DE ATUAÇÃO DAS PROTEÇÕES .....	47
6.4 UTILIZAÇÃO DE RELÉ DE PROTEÇÃO CONTRA ARCOS ELÉTRICOS .....	50
6.5 CONCLUSÃO .....	54
<b>7. CAPÍTULO 7</b> .....	<b>56</b>
<b>ESTUDO DE CASO</b> .....	<b>56</b>
7.1 INTRODUÇÃO .....	56
7.2 ESTUDO DE CURTO-CIRCUITO .....	57
7.3 AVALIAÇÃO DOS AJUSTES DAS PROTEÇÕES .....	62
7.4 CÁLCULO DOS NÍVEIS DE ENERGIA INCIDENTE .....	68
7.5 ANÁLISE DOS RESULTADOS E PROPOSTAS DE MITIGAÇÃO .....	69
7.6 CONCLUSÃO .....	78
<b>8. CAPÍTULO 8</b> .....	<b>79</b>
<b>CONCLUSÃO</b> .....	<b>79</b>
8.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	79
8.2 PROPOSTA DE CONTINUIDADE.....	80
<b>ANEXO</b> .....	<b>81</b>
A.1 CURTO-CIRCUITO TRIFÁSICO .....	81
A.2 CURTO-CIRCUITO MONOFÁSICO.....	82
A.3 DIAGRAMA UNIFILAR DA INSTALAÇÃO .....	83
A.4 ROTINA EM MATLAB PARA O CÁLCULO DA ENERGIA INCIDENTE .....	84
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	<b>85</b>

# CAPÍTULO 1

## INTRODUÇÃO

### 1.1 RELEVÂNCIA

É consenso entre os profissionais da área de eletricidade a necessidade de medidas de controle para os riscos relativos a choques elétricos. Tem-se evoluído muito nos últimos anos tanto na legislação quanto em normas técnicas e procedimentos de trabalho no que se refere a esse tema em específico. Entretanto, os riscos associados ao arco elétrico ainda carecem de mais atenção por parte dos agentes envolvidos no assunto.

Em 1982 o engenheiro Ralph Lee abordou o tema arco elétrico e seus riscos para as pessoas e trouxe pela primeira vez uma modelagem matemática consistente para o cálculo da energia incidente. Em seu trabalho *The Other Electrical Hazard: Electric Arc Blast Burns* [1], Lee mostrou que a temperatura do arco elétrico, durante um curto-circuito, pode alcançar 4 vezes a temperatura da superfície do sol, chegando a 20.000 °C, sendo o fenômeno com maior elevação de temperatura produzido pelo homem, atrás somente do raio laser (100.000 °C). Essa elevada temperatura pode causar graves queimaduras no corpo humano mesmo à distância de poucos metros e até levar o indivíduo a óbito.

Nos EUA, em seu relatório anual de estatísticas com acidentes elétricos [2], pode-se ver a relevância do tema ao se contabilizar o número de fatalidades (5587) envolvendo eletricidade ocorridos nos últimos 22 anos (período 1992 -2013), figura 1.1. Associa-se 80% dessas fatalidades às queimaduras oriundas do arco elétrico [3]. Vê-se na figura 1.1 como o número de mortes caiu significativamente na últimas duas décadas, de 334 para 139, contudo representando ainda um número significativo de óbitos. Cabe ressaltar que cerca de 2000 pessoas são hospitalizadas anualmente nos EUA devido a queimaduras resultantes de arcos elétricos [4]. Pode-se apresentar também os custos para as empresas decorrente dos acidentes. A *Occupational Safety and Health Administration*. (OSHA), em um trabalho de 2014 [5], mostra que os custos com um colaborador que se acidenta gira em torno de 62.500 dólares, quando não fatal. Se considerados determinados custos indiretos as cifras podem ser ainda maiores.

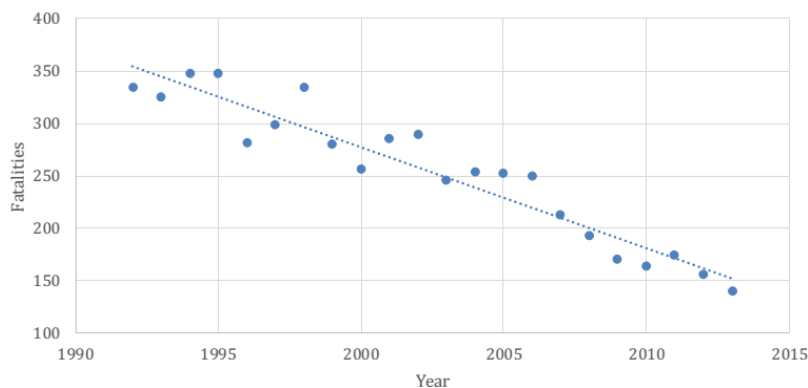


Figura 1.1 – Acidentes fatais nos EUA relacionados a eletricidade, 1992-2013 – Fonte [2]

Avaliando-se as estatísticas americanas referentes a queimaduras em geral [6], vê-se que a eletricidade como fonte causadora representa 3,6% do total (período 2005-2014). Ainda que pouco expressivo proporcionalmente, esse percentual representa quase 7000 pessoas, contabilizando-se todos os ambientes, além do industrial. Desse montante, 60% está relacionado a acidentes de trabalho, sendo dois terços desses acidentes no ambiente da indústria. Outro ponto relevante é a gravidade das queimaduras causadas por arco elétrico, que são as mais debilitantes e que deixam maiores sequelas para os acidentados [6].

No Brasil, ainda não se tem estatísticas que abrangem todo o espectro dos acidentes envolvendo arco elétrico. A referência [2] apresenta o percentual de 20% dos casos de queimaduras em acidentes de trabalho como relativos ao arco elétrico. No âmbito do setor elétrico, envolvendo as concessionárias de energia, tem-se a Fundação Comitê de Gestão Empresarial [7], que traz estatísticas de acidentes referentes apenas a esse setor. A figura 1.2 mostra os acidentes fatais envolvendo arco elétrico dos últimos 14 anos no Brasil, segundo [7].

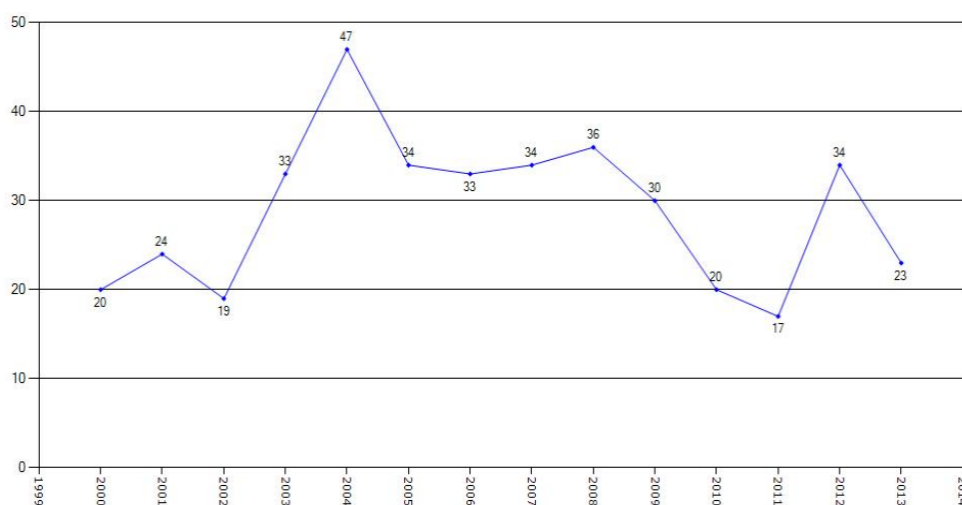


Figura 1.2 – Relatório de Estatísticas de Acidentes do Setor Elétrico Brasileiro – 2013 – Fonte [7]

Em [8] tem-se o número de mortes relacionadas a eletricidade a cada ano (ex: 590 mortes em 2015), contudo esse número reflete apenas uma parcela dos acidentes ocorridos, podendo ser de 4 a 5 vezes maior, devido ao não registro de muitos acidentes, como citado na próprio fonte. Pode-se concluir portanto que, proporcionalmente as estatísticas americanas, não é difícil estimar que no Brasil ocorram centenas de morte por arco elétrico todo ano, quando se considera todos os ambientes onde esse risco esteja presente. Posto esse cenário fica clara a necessidade de maior conscientização sobre os perigos do arco elétrico e da evolução das medidas de redução e eliminação dos riscos.

## **1.2 OBJETIVO**

O objetivo do trabalho é apresentar os conceitos de arco elétrico e energia incidente, as metodologias de cálculo bem como determinar os níveis de energia incidente de todas as subestações de uma unidade industrial, utilizando a metodologia apropriada. O trabalho também propõe medidas de controle para os riscos oriundos do arco elétrico para as pessoas e instalação, passando pelo correto dimensionamento das vestimentas antichama.

## **1.3 METODOLOGIA**

Para o desenvolvimento deste trabalho foi feita revisão bibliográfica do tema, contemplando: legislação nacional e internacional, normas técnicas nacionais e internacionais, artigos acadêmicos, artigos de revistas, dentre outros. Essa revisão possibilitou descrever o fenômeno do arco elétrico e os vastos riscos envolvidos bem como aplicar a modelagem matemática do efeito térmico da energia incidente em uma instalação real, avaliando os perigos para as pessoas e propondo formas de eliminação do risco.

Para aplicar o modelo matemático de cálculo de energia incidente é necessário inicialmente determinar o curto-circuito de todas as barras da instalação. Para isso, utiliza-se normalmente software de cálculo de curto-circuito como, por exemplo o PTW da empresa SKM. Inicialmente faz-se o levantamento de campo na unidade, de forma a levantar os dados de cabos, transformadores, capacitores, filtros de harmônicos, motores, barramentos, disjuntores, relés, controladores de velocidade, dentre outros. Todas essas informações são trazidas para o software o que possibilita determinar as correntes de curto-circuito em todos os pontos do sistema. A norma utilizada para cálculo do curto-circuito é a IEC 60909-2001 [9].

Definidas as correntes de curto-circuito, calcula-se a energia incidente em cada painel de cada subestação da unidade. Para o cálculo da energia é utilizada a metodologia definida na norma IEEE 1584-2002 [10]. Conhecidos, então, os níveis de energia incidente, são propostas formas de redução no tempo de atuação das proteções elétricas, onde esses níveis são críticos, de forma a reduzir a magnitude da energia, uma vez que o tempo de atuação da proteção e a energia incidente são proporcionais.



## 1.4 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Os tópicos do trabalho estão estruturados em 8 capítulos conforme se segue:

O capítulo 1 faz uma apresentação do trabalho mostrando a relevância do tema, o objetivo da dissertação e a metodologia utilizada. O capítulo 2 traz os conceitos de arco elétrico e energia incidente, descrevendo fisicamente o fenômeno e apresentando os riscos relacionados ao um evento de curto-circuito com a presença de arco elétrico.

O capítulo 3 apresenta as metodologias de cálculo de energia incidente, iniciando pelo método pioneiro de Ralph Lee, passando pelos métodos de Doughty e Neal, NFPA-70E, IEEE-1584, até os métodos envolvendo softwares como Arc Pro e Heat Flux.

O capítulo 4 trata das vestimentas antichama como EPI para proteção contra os efeitos do arco elétrico. São apresentados os requisitos para a fabricação e testes das vestimentas. A modelagem para a suportabilidade da pele humana ao calor é também apresentada. Por fim é feita uma consideração sobre a energia incidente da instalação e a proteção oferecida pela vestimenta.

O capítulo 5 trata da legislação, brasileira e internacional, aplicável ao tema. São feitas considerações sobre os pontos mais relevantes das normas no tocante aos riscos do arco elétrico. O capítulo traz também um tópico sobre a tendência da legislação no Brasil.

O capítulo 6 descreve as formas de mitigação dos níveis de energia incidente. São apresentadas soluções para redução da energia tanto em fase de projeto quanto na fase de operação da planta, passando pelo correto dimensionamento e especificação de equipamentos quanto pela otimização dos ajustes dos dispositivos de proteção.

O capítulo 7 é o capítulo principal do trabalho e mostra o estudo de caso feito para uma unidade industrial. São apresentados os estudos de curto-circuito, seletividade e energia incidente da instalação. É feita a análise dos resultados e medidas de redução de riscos são propostas.

O capítulo 8 traz as conclusões gerais do trabalho e apresenta propostas de continuidade para outros estudos nesse segmento.

## **CAPÍTULO 2**

### **O FENÔMENO DO ARCO ELÉTRICO E A ENERGIA INCIDENTE**

#### **2.1 INTRODUÇÃO**

Neste capítulo será apresentado o fenômeno do arco elétrico e a sua natureza física, a energia incidente gerada durante um arco, os riscos advindos da energia térmica e outros riscos adicionais existentes. O arco elétrico se inicia quando a ionização do ar é suficiente para permitir a passagem da corrente elétrica, tendo normalmente curta duração, menos de 1 s [11]. Uma vez iniciado o arco, a corrente percorre um caminho formado pelos gases metálicos gerados pela vaporização dos condutores [1], movimentando-se em alta velocidade (cerca de 100 m/s) [12]. Durante essa passagem de corrente uma grande quantidade de energia é liberada na forma de calor e ondas de pressão [11]. A liberação de energia é decorrente do caminho ionizado apresentar uma resistência elétrica à passagem da corrente [1]. Essa energia oferece uma série de riscos para as pessoas nas proximidades do evento sendo que quanto maior a proximidade entre o trabalhador e o arco elétrico maiores serão os danos causados ao indivíduo.

#### **2.2 O FENÔMENO DO ARCO ELÉTRICO**

O comportamento de um arco elétrico trifásico é caótico, envolvendo uma rápida e irregular mudança na sua geometria. Essa mudança é devida a convecção, jatos de plasma e forças eletromagnéticas. A extinção e re-ignição do arco, mudanças no trajeto e ainda outros efeitos, dificultam a modelagem precisa do arco elétrico e conseqüentemente a exatidão da sua impedância. As correntes elétricas criam forças de atração e repulsão sucessivas, movendo os jatos de plasma que por sua vez alimentam a nuvem de plasma em expansão. Essa nuvem é movida para fora formando uma poeira de plasma. Uma vez projetada para longe da fonte, as moléculas de plasma esfriam e se recombinaem, formando outros materiais. Parte dos eletrodos fundidos nesse processo também são projetadas para fora, gerando uma chuva de material derretido [12]. A figura 2.1 ilustra de modo simplificado o comportamento de um arco elétrico.

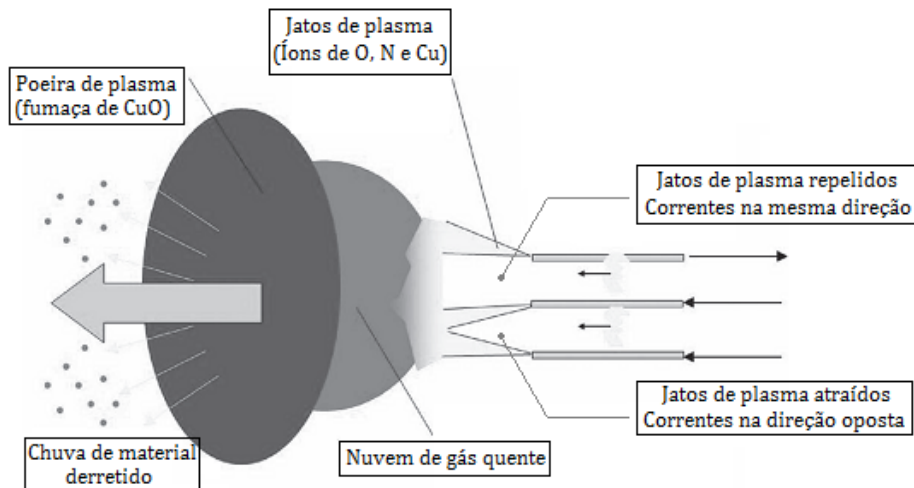


Figura 2.1 – Ilustração dos componentes do arco elétrico – Adaptado de [13]

Durante o estabelecimento do arco, a corrente começa a passar pelo ar ionizado gerando enormes quantidades de calor. Grandes volumes de gases ionizados, juntamente com o metal dos condutores vaporizados, são expelidos de forma explosiva. Enquanto o arco se mantém, a energia elétrica continua a ser convertida em outras formas de energia extremamente perigosas. Os perigos incluem o imenso calor do plasma, o calor irradiado, grandes volumes de fumaça tóxica, gotas fundidas de material condutor, estilhaços, luz extremamente intensa e uma onda de pressão dos gases em rápida expansão [12].

### 2.3 O ARCO ELÉTRICO COMO ELEMENTO DO CIRCUITO

Avaliando-se o arco como um componente do circuito elétrico, verifica-se que o nível de tensão tem grande influência no fenômeno. O vapor gerado durante o arco elétrico possui resistência muito superior ao metal em estado sólido. Sabe-se que a queda de tensão ao longo de um arco elétrico está entre 30 e 40 V/cm, milhares de vezes maior do que seria no condutor sólido. A indutância do arco é desprezível o que torna sua impedância puramente resistiva, logo com fator de potência unitário. Em baixa tensão a queda de tensão referente ao arco consome uma parte significativa da tensão fornecida ao circuito. Assim, apenas a diferença entre a tensão da fonte e a tensão de arco irá forçar a corrente de falta através da impedância total do sistema. Esse fato leva a corrente de falta a uma certa estabilização para sistemas em baixa tensão [1].

Para circuitos com tensão mais elevada, o comprimento do arco é consideravelmente maior, considerando a queda de tensão de 40 V/cm, é fácil notar que esse valor é pouco representativo para sistemas de média e alta tensão, que operam com dezenas de milhares de volts, fato esse que não permite a estabilização do arco. Dessa forma a ocorrência do arco elétrico nesses sistemas podem levar a novos curtos-circuitos, se o arco elétrico atingir outros circuitos ou equipamentos [1].

Para configurações fechadas, onde existe um invólucro circundando os condutores, exemplo painel elétrico, o confinamento do arco elétrico provoca a redução da sua impedância, o que não ocorre para as configurações abertas [14]. A tensão de arco também tende a ser menor em configurações fechadas. Outro ponto importante, relatado em [11], é o incremento na energia térmica liberada para as configurações fechadas. O confinamento do arco tende a direcionar essa energia para a parte aberta, aumentando ainda mais a densidade energética fornecida pelo arco elétrico naquela direção. Essa densidade de energia pode aumentar por um fator de 3 para as configurações fechadas dependendo da corrente de falta [11].

Verifica-se então que o nível de tensão terá grande influência na corrente de falta, uma vez que a tensão resultante no circuito será a tensão da fonte subtraída da tensão de arco (30 a 40 V/cm). Sistemas em média tensão terão sua corrente de curto-circuito pouco reduzida em função da impedância do arco elétrico, quando comparados a sistemas de baixa tensão [10]. As configurações fechadas reduzem a impedância do arco elétrico devido ao confinamento dos condutores bem como aumentam a transferência de energia na forma convectiva.

## **2.4 ENERGIA INCIDENTE**

Dentre os perigos apresentados quando da ocorrência do arco elétrico, tem-se a energia incidente como o risco mais relevante, uma vez que essa energia é a que causa maiores ferimentos aos trabalhadores expostos a um arco elétrico [1]. Dessa forma é fundamental compreender quais fatores influenciam na intensidade da energia incidente bem como a metodologia para determinar o seu valor.

Segundo [4], energia incidente é a quantidade de energia térmica impressa em uma superfície, a uma dada distância da fonte, gerada durante a ocorrência de um arco elétrico. Em [15] a energia incidente é definida como parte da energia liberada como resultado do arco elétrico ou do fogo repentino que incide sobre determinado ponto de interesse. A energia incidente é informação fundamental para a determinação da proteção adequada para o trabalhador sendo normalmente indicada em cal/cm<sup>2</sup>.

Sabe-se que a transmissão do calor liberado durante a ocorrência de um arco elétrico se dá predominantemente por radiação, sendo que a transmissão por condução e convecção também estão presentes [11]. A tabela 2.1 apresenta um comparativo dos riscos entre os eventos de arco elétrico e fogo repentino. Pode-se notar como a energia incidente no caso do arco elétrico pode chegar a valores superiores a 100 cal/cm<sup>2</sup> ao passo que para fogo repentino chega-se a 30 cal/cm<sup>2</sup> para os piores casos. Outro ponto relevante apresentado na tabela 2.1 é que bastam poucos décimos de segundo para que uma enorme quantidade de energia seja liberada, pois o arco elétrico raramente dura mais de 1 segundo.

Tabela 2.1 – Principais riscos: Comparação entre arco elétrico e fogo repentino – Fonte [11]

HAZARD EXPOSURE FACTORS	ELECTRIC ARC	FLAME
Total Incident Energy Range, Cal/cm <sup>2</sup>	2 to > 100	4 to 30
Percent Radiant Energy	90	30-50
Percent Convective Heat Energy	10	50-70
Potential Exposure Time, seconds	0.01 to > 1	1 to 15
Concussive Forces	High	Variable
Amount of Ionized Air Present	High	Moderate
Presence of Smoke/Fumes	Yes	Yes
Molten Metal Splatter	Yes	No
Mechanism for Recurrence	Reclosing	Re-ignition

Para quantificar a energia incidente oriunda de um arco elétrico são necessários alguns dados da instalação, como: nível de tensão, valores das correntes de curto-circuito, tipo de aterramento do sistema, arranjo físico dos conjuntos de manobra, distância entre os barramentos e o tempo de atuação dos dispositivos de proteção [10]. A figura 2.2 ilustra de forma didática a transferência da energia radiante da fonte do arco elétrico para um objeto esférico a uma distância  $r$ .

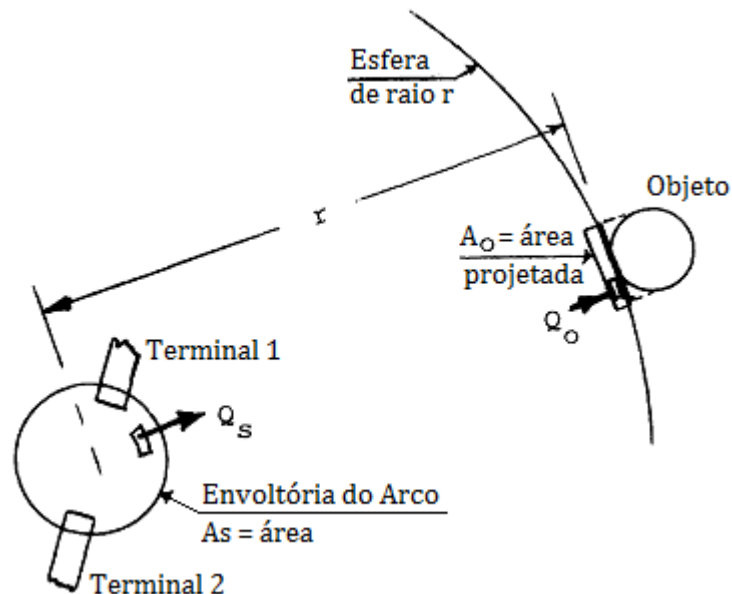


Figura 2.2 – Calor transferido da fonte (arco elétrico) para um objeto a uma distância  $r$  – Adaptado de [1]

O arco se dá entre os terminais 1 e 2, a área da esfera  $A_s$  delimita a região para o movimento do arco.  $Q_s$  representa a energia emitida por unidade de área e  $Q_o$  indica a quantidade de energia absorvida pela superfície do corpo. A energia absorvida pelo objeto, segundo [1], se dá conforme a equação 2.1.

$$Q_o = \frac{Q_s \times A_s}{4\pi r^2} A_o \quad (2.1)$$

Essa modelagem foi apresentada como uma primeira proposta para o cálculo da energia absorvida por um corpo a uma dada distância de um arco elétrico.

## 2.5 OUTROS RISCOS ASSOCIADOS

Conforme apresentado nos tópicos 2.2 muitos riscos estão associados ao arco elétrico, sendo o mais perigoso deles a energia incidente (radiação e convecção), conforme detalhado no item 2.4. Contudo não se pode ignorar outros efeitos do arco, como a onda de pressão gerada durante o evento.

A elevada temperatura causa a expansão do ar ao redor do arco elétrico bem como a expansão do metal que constitui o condutor [4]. O cobre, por exemplo, expande 67000 vezes o seu volume quando passa do estado sólido para gasoso. Os riscos associados a essa expansão são ondas de pressão, ruído de alta intensidade e projeção de estilhaços. As ondas de pressão podem facilmente chegar a uma magnitude de  $10^5$  Pascal, valor suficiente para arremessar um ser humano, causar rompimento dos tímpanos e colapsar os pulmões. A intensidade do ruído associado a esse fenômeno pode chegar a 160 dB. Ressalta-se que o máximo ruído de impacto tolerável pelo ouvido humano sem sofrer danos é 140 dB [5] [16]. Finalmente o material derretido é expelido para fora da região do arco e atinge uma velocidade de 1100 km/h, rápido o suficiente para que os estilhaços penetrem completamente no corpo humano. Para o cálculo da pressão gerada por um arco elétrico a equação 2.2 pode ser utilizada [17].

$$P = 1500 \cdot \frac{I \times t}{D} \quad (2.2)$$

Sendo P a pressão [Pa], I a corrente de arco [kA], D a distância [m] e t o tempo de duração do arco [s].

Verifica-se que os efeitos produzidos pelo arco elétrico colocam em risco a integridade física dos trabalhadores que estiverem nas imediações do ponto de defeito, com grandes chances de fatalidade ou lesão grave. Outro ponto pertinente são as consequências do arco elétrico para a instalação, os equipamentos sofrerão avarias consideráveis quanto expostos a elevada solicitação térmica e mecânica. Faz-se portanto, necessário criar medidas de controle não somente para os riscos da energia incidente, mas também para os riscos associados às ondas de pressão.

## 2.6 CONCLUSÃO

O arco elétrico é um fenômeno de natureza caótica e modelagem complexa, sua dinâmica varia conforme as características da instalação e determinar sua impedância não é uma tarefa trivial. Os efeitos do arco elétrico em um circuito estão relacionados a conversão da energia elétrica em outras formas de energia perigosas, a qual representa riscos para o ser humano e também para os equipamentos. Os riscos que surgem da ocorrência do arco estão relacionados à conversão da energia elétrica em outras formas de energia perigosas. A ocorrência do arco representa um risco

grave, potencialmente fatal, devido às queimaduras que podem ser causadas pelo calor bem como outros danos potenciais associados à luz intensa e outras radiações, às elevadas ondas de pressão, ao ruído e às fumaças tóxicas. Deve-se buscar, portanto, mecanismos de controle para atenuar as consequências do arco elétrico, sob risco de expor as pessoas a condição de perigo, o que não é concebível sob nenhum contexto.

## CAPÍTULO 3

### METODOLOGIAS DE CÁLCULO DA ENERGIA INCIDENTE

#### 3.1 INTRODUÇÃO

Os riscos associados ao arco elétrico implicam na necessidade de medidas preventivas, sob pena de perdas materiais e perdas humanas, sendo que a última é inconcebível sob qualquer aspecto. Dentre esses riscos, aquele que apresenta maior histórico de lesões ao seres humanos, conforme apresentado no primeiro capítulo, é a energia incidente, que pode provocar queimaduras de 2º e 3º grau, podendo levar o indivíduo a óbito [11]. Dessa forma, maior atenção será dada a energia incidente, aos modelos matemáticos para o cálculo da sua magnitude e as medidas de precaução proporcionais aos efeitos esperados.

A energia produzida por um arco elétrico ( $E_a$ ) pode ser definida como a integral do produto da tensão de arco ( $V_a$ ) e a corrente de arco ( $I_a$ ) no intervalo de duração do evento [11]. Uma vez que o arco apresenta característica puramente resistiva e por conseguinte fator de potência unitário, o produto de  $V_a$  por  $I_a$ , para cada instante de tempo, resulta na potência ativa instantânea. A integral desse produto ao longo de um dado tempo resulta na energia total fornecida pelo arco elétrico. Não obstante, somente parte dessa energia será convertida em energia incidente [11].

$$E_a = \int_0^t V_a \cdot I_a \cdot dt \quad (3.1)$$

Determinar os valores de  $V_a$  e  $I_a$  não é uma tarefa trivial, sendo que para o cálculo final de  $E_a$  se tem outras abordagens.

Neste capítulo serão apresentadas as principais metodologias de cálculo da energia incidente e as limitações de cada método, passando pelo método de Ralph Lee [1], pioneiro no cálculo de energia incidente, pelo método de Doughty-Neal [11] [18] [14] e o método IEEE [10]. Será feita também uma consideração sobre os métodos de cálculo envolvendo softwares, que tem maior aplicação em sistemas de alta e extra alta tensão.

#### 3.2 MÉTODO DE RALPH LEE

O trabalho de Lee [1], focou inicialmente em determinar as distâncias seguras para os trabalhadores nas imediações do arco elétrico. A partir de [19] Lee apresentou as temperaturas que podem causar queimaduras curáveis ( $T < 80^\circ\text{C}$ ) e incuráveis ( $T > 96^\circ\text{C}$ ), para tempos de exposição iguais a 100 ms, e propôs modelos para o cálculo das distâncias seguras para que queimaduras incuráveis não ocorressem. A figura 3.1 apresenta os valores de temperatura para os quais tem-se queimaduras curáveis e incuráveis para diferentes tempos de exposição.



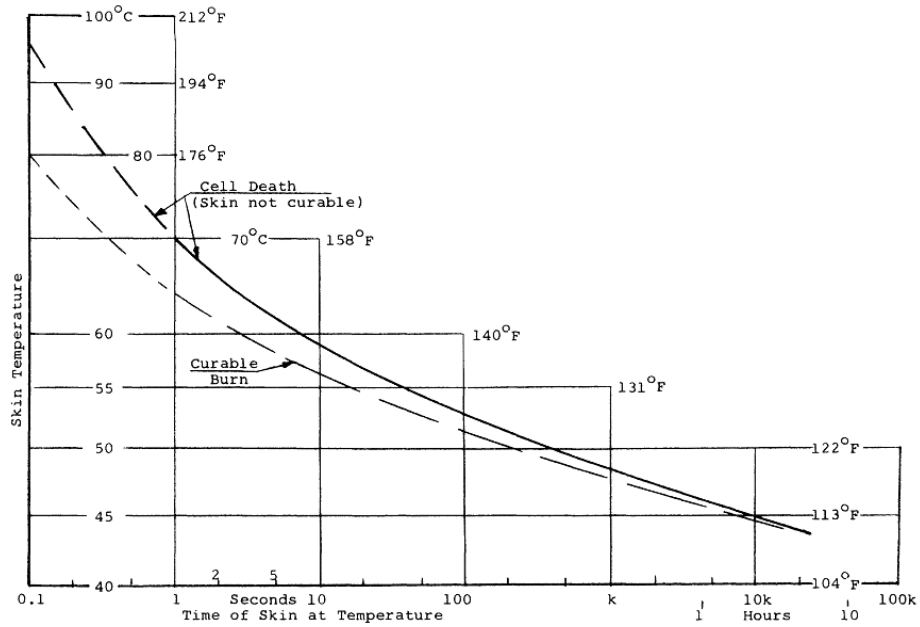


Figura 3.1 – Tolerância do tecido humano à elevação de temperatura em função do tempo – Fonte [1]

O método de Ralph Lee [1] baseia-se no modelo do arco elétrico atuando como uma resistência estática. Para modelar o sistema na presença do arco elétrico, Lee considerou o circuito abaixo, figura 3.2. O circuito consiste em uma fonte de tensão  $E_{\infty}$ , a impedância do sistema  $Z_s$  até o ponto da falta e a resistência do arco elétrico  $R_a$ . Foi desconsiderada a resistência do sistema até o ponto de falta.

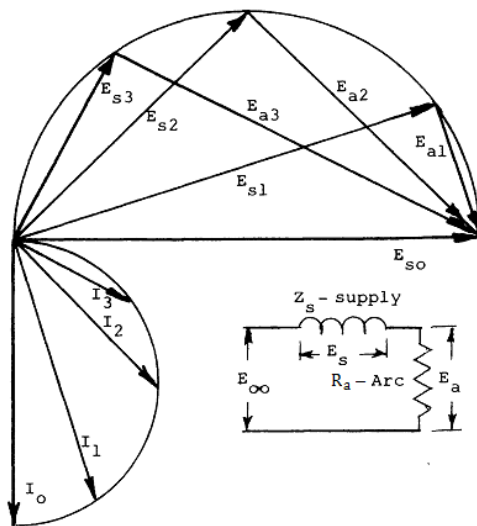


Figura 3.2 – Diagrama fasorial da tensão e corrente a medida que se varia  $R_a$  – Adaptado de [1]

Nota-se, como já esperado, que  $E_s$  e  $E_a$  estão em quadratura para todos os valores de  $R_a$ . Sabe-se da teoria de circuitos elétricos que a máxima transferência de potência para  $R_a$  se dá quando  $|Z_s|=|R_a|$ , o que implica em  $E_s = E_a$ . Dessa forma para se determinar a máxima potência transferida da fonte para o arco elétrico, Lee considerou a resistência do arco igual a impedância da fonte, por consequência a máxima potência do arco será metade da potência de curto-circuito

naquele ponto. O cálculo da energia incidente pode então ser determinado se conhecida a potência de curto-circuito no ponto desejado e o tempo de duração do arco elétrico, relacionado com o tempo de atuação da proteção. A equação 3.2 mostra como realizar o cálculo da energia incidente pelo método de Ralph Lee.

$$E = 0,512 \cdot V \cdot I_{bf} \cdot \left( \frac{t}{D^2} \right) \quad (3.2)$$

- E → Energia Incidente (cal/cm<sup>2</sup>);
- V → Tensão do sistema (kV);
- t → Tempo de duração do arco (s);
- D → Distância do arco ao indivíduo (mm);
- I<sub>bf</sub> → Corrente de curto-circuito franco no ponto estudado (kA).

A equação 3.2 oferece baixa complexidade para o cálculo da energia incidente e pode ser facilmente aplicada se conhecido o tempo de atuação do dispositivo de proteção do circuito. É possível também, se conhecido o valor de energia incidente que provoca queimaduras do 2º grau, resolver a equação 3.2 para D e determinar a distância segura para aproximação das pessoas. Lee chegou a apresentar, para um tempo de exposição de 100 ms e para determinadas distâncias, qual a potência de arco que causaria queimaduras curáveis e incuráveis. A tabela 3.1 apresenta os resultados encontrados à época.

*Tabela 3.1 – Potência do Arco x Distância – Adaptado de [1]*

Distância		Potência do Arco - MW	
Polegada	cm	Curável	Incurável
20	50	5,2	7
24	61	7,5	10
30	76,2	11,8	16
36	81,4	17	23
60	152,4	47	64
120	304,8	189	256

Apesar da coerência matemática utilizada para a construção do método de Ralph Lee, existem algumas considerações de ordem prática que não fazem da equação 3.2 um modelo de uso geral. O cálculo da energia incidente considerando a resistência do arco igual a impedância da rede, dificilmente ocorre em casos práticos [11] o que não leva, assim, o sistema à máxima transferência de potência. Ademais, a resistência do arco apresenta um comportamento dinâmico durante o curto-circuito modificando o seu valor ao longo do tempo. Cabe destacar também que o modelo considera toda a energia elétrica fornecida convertida em energia incidente, o que na realidade não ocorre, uma parte significativa da energia é consumida no processo de fusão e vaporização dos

condutores e deslocamento do ar (ondas de pressão) [11]. Outra limitação do método é a inexistência de uma forma para calcular a corrente, o que dificulta determinar o tempo de duração do arco elétrico. Por último o trabalho de Ralph Lee não avaliou o efeito do confinamento do arco, o que não permite sua aplicação para o cálculo de energia incidente em painéis elétricos, onde atualmente se concentram o maior número de acidentes. Sabe-se de [14] que o confinamento do arco elétrico pode majorar a energia incidente em até 3 vezes.

Por muito anos essa foi a única referência para se determinar a energia incidente oriunda de um arco elétrico, sendo ainda um recurso disponível para configurações abertas até 600 V, onde se tem bons resultados [4]. Contudo, se mostra muito conservador à medida que se eleva o nível de tensão. A metodologia aplicada a pátio de subestações, linhas de transmissão e redes de distribuição, fornece resultados exageradamente conservadores, sendo na prática não utilizados. Não obstante o modelo de Lee se assenta como uma referência de máximo valor teórico para a energia incidente e na ausência de informações suplementares, necessárias a outras metodologias, pode se recorrer a ele para o cálculo em configurações abertas.

### 3.3 MÉTODO DE DOUGHTY-NEAL

O método de Doughty-Neal é o produto de uma série de testes realizados em laboratório para diferentes cenários, em configurações abertas e fechadas. A metodologia apresenta um progresso em relação ao método teórico de Ralph Lee que se mostrava muito conservador. O avanço alcançado por Doughty e Neal se deve, além de outros fatores, aos resultados obtidos através de medições (sensores), permitindo a comparação direta com o método de Lee. As figuras 3.3 e 3.4 ilustram ensaios típicos para os testes em configurações abertas e fechadas. A pesquisa de Doughty e Neal está retratada em três artigos, na ordem cronológica [11], [18] e [14], sendo que as fórmulas de cálculo da energia incidente são apresentadas no último deles [14].

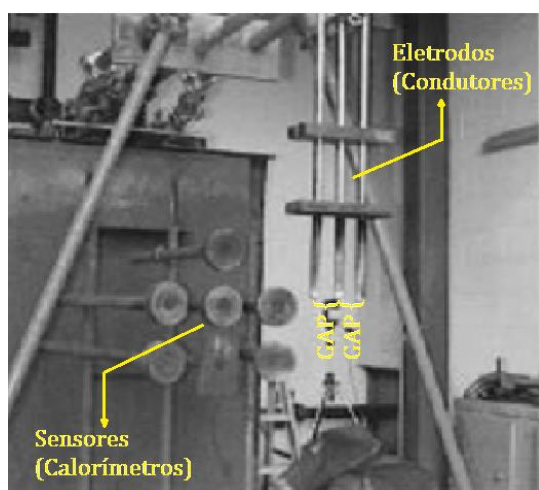


Figura 3.3 – Teste em configuração aberta – Adaptado de [14]

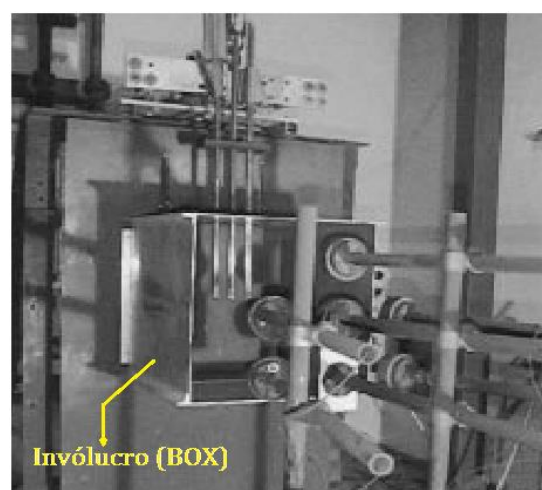


Figura 3.4 – Teste em configuração fechada – Adaptado de [14]

O trabalho de Doughty e Neal possibilitou uma maior compreensão do fenômeno do arco elétrico bem como um aperfeiçoamento na forma de cálculo da energia incidente. Os estudos mostraram, o que já era previsto por Lee [1], que nem toda energia fornecida pela fonte é convertida em energia incidente. Cabe citar que parte significativa dessa energia é consumida no processo de fusão e vaporização dos condutores. A referência [11] mostra que essa energia varia de 3 a 20% do total da energia fornecida.

Outro ponto constatado refere-se a resistência do arco normalmente menor que a impedância do sistema e que, portanto, não leva o circuito à condição de máxima transferência de potência, conforme considerado em [1]. Em [11] tem-se um exemplo onde a resistência do arco se apresentou 20% menor que a impedância do sistema, essa verificação é ainda mais segura em sistemas de média e alta tensão.

Os ensaios realizados mostraram que para sistemas em 600 V em configurações abertas, por exemplo, a energia incidente medida ficou próxima a 80% do máximo teórico [11]. Já para sistemas em 2.400 V as medições foram próximas de 40% desse máximo. Contudo, para as configurações fechadas os valores alcançados podem ser até três vezes maiores do que para as configurações abertas, em especial pela contribuição do calor na forma convectiva que se torna mais relevante, devido à expansão do gás quente [14]. A figura 3.5 mostra como a energia incidente se torna maior para as duas configurações à medida que se aumenta a corrente de falta.

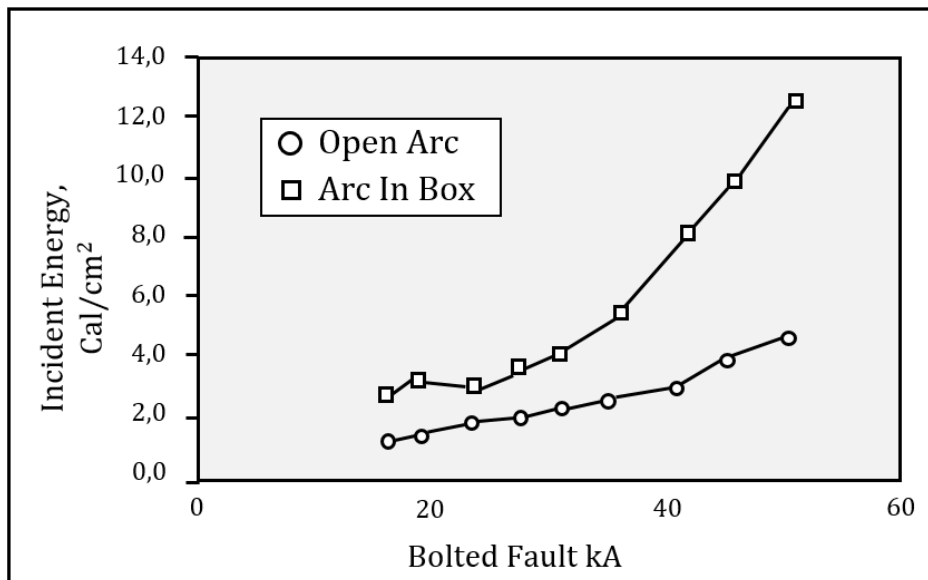


Figura 3.5 – Energia Incidente para as configurações aberta e fechada em função da corrente de falta – Adaptado de [14]

Abaixo, as equações 3.3 e 3.4 fornecem a energia incidente para configurações abertas e fechadas, respectivamente, pela metodologia de Doughty-Neal [14].

$$E_{MA} = 5271 \cdot D^{-1,9593} t_A (0,0016 \cdot F^2 - 0,0076 \cdot F + 0,8938) \quad (3.3)$$

$$E_{MB} = 1038,7 \cdot D^{-1,4738} t_A (0,0093 \cdot F^2 - 0,3453 \cdot F + 5,9675) \quad (3.4)$$

Sendo:

- $E_{MA}$  → Energia Incidente em configurações abertas (cal/cm<sup>2</sup>);
- $E_{MB}$  → Energia Incidente em configurações fechadas (cal/cm<sup>2</sup>);
- $D$  → Distância do arco ao indivíduo (in);
- $t_A$  → tempo de duração do arco (s);
- $F$  → Corrente de curto-circuito franco no ponto estudado (kA).

Uma decorrência importante das equações 3.3 e 3.4 é a dependência linear da energia incidente com o tempo de duração do arco elétrico. Essa constatação será importante para definir medidas de atenuação dos efeitos do arco, as quais passarão em sua maioria pela redução no tempo de duração do evento.

Ainda no que tange a máxima energia transferida, verificou-se que essa não é a condição de máxima energia incidente. Os ensaios mostraram que a conversão da energia elétrica em energia radiante se dá para uma resistência de arco maior que o previsto em [1]. A máxima energia incidente ocorre, normalmente, para um espaçamento maior do que aquele que produz a máxima transferência de energia para o arco. Esse comportamento é apresentado na figura 3.6.

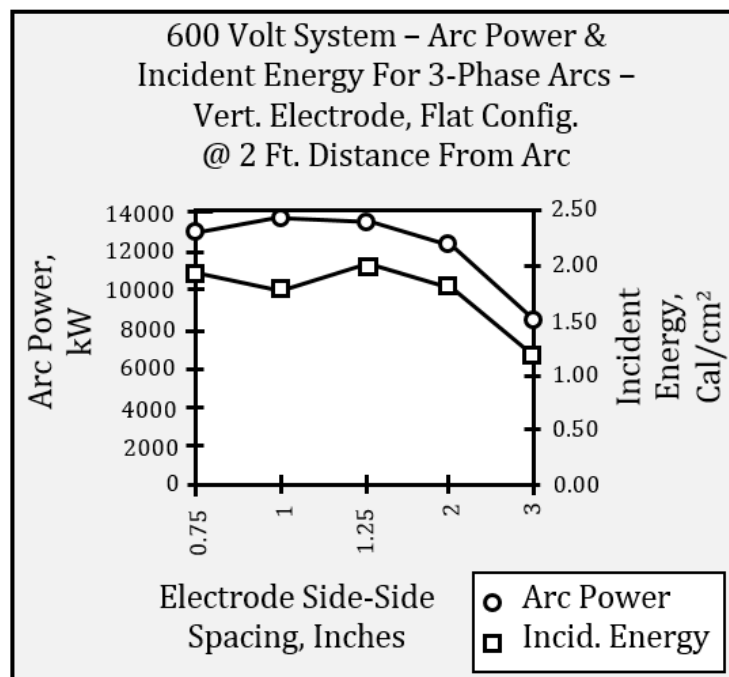


Figura 3.6 – Energia do arco e energia incidente para um sistema trifásico em configuração aberta – Adaptado de [18]

Vê-se, no caso apresentado, que a máxima energia do arco ocorre para um espaçamento dos condutores igual a 1 polegada, já a máxima energia incidente ocorre para 1,25 polegadas.

A metodologia de Doughty-Neal representou um avanço na determinação da energia incidente, aprofundando no estudo do fenômeno do arco elétrico bem como apresentando um método mais eficiente de cálculo do que o que foi proposto por Ralph Lee. O método pode ser aplicado em sistemas até 600 V com corrente de curto-circuito entre 16 e 50 kA. Apesar da limitação no nível de tensão existe uma significativa esfera para seu uso, uma vez que inúmeros são os painéis elétricos que operam nesse nível de tensão. Cabe destacar que na indústria, não raro, os maiores níveis de energia incidente aparecem na baixa tensão, devido aos níveis de curto-circuito serem normalmente mais elevados que na média tensão.

### **3.4 MÉTODO IEEE 1584**

Após o trabalho de Doughty e Neal no ano 2000, o IEEE concluiu um trabalho, publicado no ano de 2002, que se difundiu como o método mais comum de cálculo de energia incidente devido a sua abrangência. A elaboração desse trabalho considerou os estudos até então desenvolvidos, passando pelo trabalho de Ralph Lee, Doughty-Neal e outros estudos e testes complementares. Foram incluídos resultados de pelo menos 300 testes, em configurações fechadas, realizados ao longo dos anos 90 [20]. O *IEEE Standard 1584 –2002 - Guide For Performing Arc-flash Hazard Calculation* [10], apresentou uma metodologia que estendeu os limites de aplicação do cálculo de energia incidente, podendo ser utilizado em sistemas trifásicos, em configurações abertas ou fechadas e em baixa ou média tensão, suportando uma faixa bem mais extensa para a corrente de falta do que foi apresentado em [14]. Todavia os riscos relativos a projeção de material derretido, estilhaços, ondas de pressão e fumaça tóxica ainda não foram contemplados nessa metodologia. O método proposto não contempla faltas monofásicas uma vez que os maiores valores de energia incidente ocorrem para faltas trifásicas.

Para a análise que será realizada nesse trabalho será utilizado o método IEEE para o cálculo de energia incidente. Isto posto, será dado maior detalhamento dessa metodologia do que foi dado nas anteriores. Todas as considerações para a modelagem são referenciadas em [10].

Para utilização da metodologia são necessárias as informações abaixo:

- Tensão nominal;
- Corrente de curto-circuito trifásica;
- Tipo de instalação: barramento exposto ou encapsulado;
- Tipo de equipamento: conjunto de manobra, CCM, cabos;
- Distância entre os condutores no local do arco elétrico (gap);
- Tipo de aterramento do neutro dos transformadores;

- Tempos de atuação dos dispositivos de proteção;
- Tempos de abertura de disjuntores;

A tabela 3.2 mostra as os limites de aplicação da metodologia.

*Tabela 3.2 – Limites de aplicação para o método de cálculo IEEE 1584 – Adaptado de [10]*

PARÂMETRO	FAIXA DE APLICAÇÃO
Nível de Tensão	0,208 a 15kV
Frequência	50 ou 60Hz
Corrente de Falta	0,7 a 106kA
Distância entre fases (GAP)	13 a 152mm
Equipamento	Barramentos expostos, CCM, conjunto de manobra, painéis, disjuntores, cabos
Aterramento	Isolado, solidamente aterrado, aterrado por alta impedância, aterrado por baixa impedância
Número de Fases	3

### Corrente de Curto-circuito

A corrente de curto-circuito durante a ocorrência de um arco elétrico sofre um decréscimo em relação a corrente de curto sem a presença do arco. Esse fenômeno ocorre devido à existência de uma impedância que surge no canal por onde se dá o arco elétrico, conforme já relatado anteriormente. Em sistemas de média tensão, esse decréscimo não é tão representativo quanto em sistemas de baixa tensão. Assim, são propostas duas fórmulas de cálculo para a corrente limitada por arco, sendo uma para baixa tensão, equação 3.5, onde aparece o fator G, e outra para média tensão, sem a presença do fator G, equação 3.6. Cabe frisar que o fator G (distância entre os condutores) possui relação direta com a resistência do arco. O cálculo da corrente limitada por arco elétrico ( $I_a$ ) depende da corrente de curto-circuito franco, tipo de instalação, tensão nominal e da distância entre os condutores, conforme tabela 3.2. Abaixo são apresentadas as respectivas equações.

Tensão abaixo de 1kV:

$$\log(I_a) = K + 0,662 \times \log(I_{bf}) + 0,0966 \times V + 0,000526 \times G + 0,5588 \times V \times \log(I_{bf}) - 0,00304 \times G \times \log(I_{bf}) \quad (3.5)$$

Tensão maior ou igual a 1kV

$$\log(I_a) = 0,00402 + 0,983 \times \log(I_{bf}) \quad (3.6)$$

Onde:

- $I_a \rightarrow$  corrente de curto-circuito limitada por arco elétrico (kA);
- $K \rightarrow -0,097$  (configurações fechadas) ou  $-0,153$  (configurações abertas);
- $I_{bf} \rightarrow$  corrente de curto-circuito transitória simétrica eficaz (kA);
- $V \rightarrow$  tensão do sistema (kV);
- $G \rightarrow$  distância entre os condutores (mm).

Deve-se calcular também a corrente corresponde a 85% do valor de  $I_a$ . Essa consideração tem por objetivo garantir a avaliação dos casos em que uma pequena variação de corrente implique em uma grande variação do tempo de atuação da proteção (relés, fusíveis e disjuntores), bem como atenuar o efeito dos cálculos de curto-circuito muito conservadores. Uma vez que a energia incidente e o tempo total de duração do arco são diretamente proporcionais, é de suma importância que se faça essa verificação. Ambos os casos serão considerados nesse trabalho, 100% e 85%. Para o cálculo da corrente de curto-circuito máximo foi utilizada a corrente  $I_{bf}$  (transitória, simétrica, eficaz) e para o cálculo da corrente de curto mínimo utilizou-se a corrente  $I_k$  (regime permanente) multiplicada por 0,85.

### **Cálculo da Energia Incidente Normalizada**

O próximo passo após a determinação das correntes de curto-circuito é o cálculo da energia incidente normalizada, que será utilizada para o cálculo da energia incidente final. Essa energia deve ser calculada considerando uma distância típica de trabalho de 610 mm (distância entre o profissional e o ponto de defeito) e um tempo de atuação da proteção de 200 ms (relé + disjuntor). A energia incidente normalizada é apenas um passo matemático intermediário. O cálculo é feito pela equação 3.7.

$$\log(En) = K1 + K2 + 1,081 \times \log(Ia) + 0,0011 \times G \quad (3.7)$$

Onde:

- $En \rightarrow$  Energia incidente normalizada (J/cm<sup>2</sup>);
- $K1 \rightarrow -0,555$  (barramento encapsulado) ou  $-0,792$  (barramento aberto);
- $K2 \rightarrow 0$  (não aterrados ou aterrados com alta resistência) ou  $-0,113$  (sistemas aterrados);
- $I_a \rightarrow$  corrente de curto-circuito limitada por arco elétrico calculada (kA);
- $G \rightarrow$  distância entre os condutores (mm).



## Considerações Práticas

Para a determinação da energia incidente (E) é necessário obter o tempo (t) de atuação das proteções (ajustes de relés e disjuntores, curvas dos fusíveis e elos fusíveis) bem como a distância entre o trabalhador e a fonte do arco elétrico (D). É necessário também determinar o espaçamento entre os condutores das três fases (G). Em [10] tem-se a possibilidade de utilizar valores típicos para essas variáveis.

A distância de trabalho fornecida pela tabela 3.3 refere-se a distância da cabeça e tronco ao ponto do arco elétrico e não à distância das mãos, normalmente mais próximas ao arco. A cabeça e o tronco possuem maior área e uma vez afetadas são as que levam as lesões mais graves. Segundo [6] quanto maior a área afetada pelas queimaduras, maior a probabilidade de fatalidade. Dessa forma as distâncias de trabalho, fornecidas pela tabela 3.3, visam a proteção da cabeça e tronco contra as queimaduras de 2º grau. Ainda que não se garanta a proteção das mãos para as distâncias de trabalho definidas, o risco de fatalidade será diminuto em função da área das mãos e braços não ser tão expressiva.

Tabela 3.3 – Classes dos equipamentos e distâncias de trabalho - Adaptado de [10]

TIPO DE EQUIPAMENTO	DISTÂNCIA TÍPICA DE TRABALHO (mm)
Conjunto de manobra 15 kV	910
Conjunto de manobra 5 kV	910
Conjunto de manobra de baixa tensão	610
CCMs e painéis de baixa tensão	455
Cabos	455
Outros	Determinar em campo

A tabela 3.4 indica os valores usuais para os tempos de abertura de disjuntores de acordo com o nível de tensão. Apesar desse tempo apresentar diferenças devido à tecnologia empregada no mecanismo de abertura, meio isolante, número de atuações do disjuntor, tempo de uso, etc., a tabela 3.4 se mostra uma boa referência, quando for onerosa a obtenção desses dados em campo. Ressalta-se que para a maioria dos casos a temporização dos relés e disjuntores será mais significativa para o valor da energia incidente do que o próprio tempo de abertura dos disjuntores.

Tabela 3.4 – Tempos típicos de operação de disjuntores em 60Hz - Adaptado de [10]

TIPO DE DISJUNTOR	t <sub>ABERTURA</sub> (CICLOS)	t <sub>ABERTURA</sub> (s)
Baixa tensão (<1.000 V)	3	0,05
Média tensão (1–35 kV)	3 - 5	0,05 - 0,08
Alta tensão (>35 kV)	3	0,05

Obs.: Esta tabela não considera os tempos de operação dos relés externos.

A tabela 3.5 apresenta os fatores de distância  $x$  e as distâncias típicas de espaçamento entre os barramentos (G). O fator de distância  $x$  está relacionado ao nível de tensão e a geometria envolvida. O mesmo foi obtido empiricamente ao longo dos ensaios realizados e considerados para a elaboração da metodologia IEEE. O fator  $x$  não é, portanto, um dado a ser obtido em campo.

Ainda na tabela 3.5, a coluna que fornece os valores típicos para o espaçamento entre condutores (G) indica uma faixa de valores para configurações abertas (expostas) e valores definidos para as configurações fechadas (equipamento). No caso de barramentos expostos, existe a necessidade de estudos complementares para definir as distâncias entre as fases. Para as configurações fechadas, normalmente painéis elétricos, a tabela traz valores típicos definidos. A utilização da tabela 3.5 é favorecida pelo fato da energia incidente, próxima do seu valor máximo, não ser muito sensível a variação do espaçamento (G) entre os eletrodos [18]. A figura 3.7 apresenta dois exemplos, 480 V e 13,8 kV com as seguintes características:  $I_{bf} = 1$  kA;  $t = 1$  s; solidamente aterrado, com variação do GAP de 13 a 152 mm. Vê-se como os sistemas em baixa tensão são mais sensíveis a variação do GAP, contudo projetos nesse nível de tensão não possuem variação tão significativa no espaçamento entre os condutores (barramentos) quanto sistemas de média tensão. Essa constatação tem um efeito facilitador do ponto de vista prático, pois favorece o uso do valor típico para o GAP sem maiores prejuízos dos resultados.

Tabela 3.5 – Fator 'x' e GAP entre condutores para tipos de equipamentos e classes de tensão – Adaptado de [10]

TENSÃO NOMINAL (KV)	TIPO DE EQUIPAMENTO	GAP ENTRE CONDUTORES (mm)	FATOR DE DISTÂNCIA x
0,208 – 1	Exposto	10 – 40	2
	Conjunto de manobra	32	1,473
	CCM e painéis	25	1,641
	Cabos	13	2
>1 – 5	Exposto	102	2
	Conjunto de manobra	13 – 102	0,973
	Cabos	13	2
>5 – 15	Exposto	13 – 152	2
	Conjunto de manobra	152	0,973
	Cabos	13	2

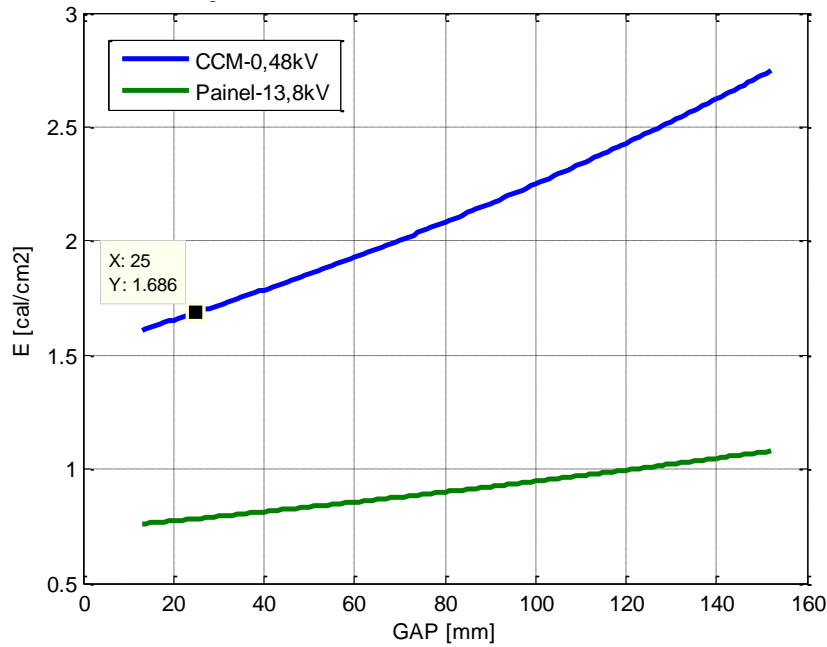


Figura 3.7 – Variação da energia incidente com o GAP

Para os cálculos de energia incidente desenvolvidos nesse trabalho foram utilizadas as tabelas 3.3, 3.4 e 3.5 com valores típicos em vista da grande heterogeneidade dos equipamentos da instalação. Ressalta-se que as tabelas 3.3 e 3.5 são transcritas diretamente da IEEE-1584, ao passo que a tabela 3.4 foi elaborada a partir do texto de [10], em especial do seu último *amendment* (b) em 2011.

### Cálculo da Energia Incidente

De posse dos valores da energia incidente normalizada  $E_n$ , os valores de  $D$  e  $t$ , passa-se, por fim, ao cálculo da energia incidente  $E$ . Cabe ressaltar que o valor de  $t$  não é somente do disjuntor, e sim o tempo de abertura do disjuntor somado com o tempo de atuação do relé. Em casos de circuitos de baixa tensão protegidos por disjuntor, onde não haja relés de proteção, é considerado somente o tempo de atuação do disjuntor. Para circuitos protegidos por fusíveis deve ser considerado somente o tempo de atuação do fusível (*clearing time*).

A equação 3.8 indica o cálculo para a energia incidente.

$$E = C_f \times E_n \times \left(\frac{t}{0,2}\right) \times \left(\frac{610^x}{D^x}\right) \quad (3.8)$$

Onde:

- $E \rightarrow$  Energia incidente ( $\text{cal}/\text{cm}^2$ );
- $Cf \rightarrow$  Fator de tensão: 1 (tensão  $> 1$  kV) ou 1,5 (tensão  $\leq 1$  kV);
- $En \rightarrow$  energia incidente normalizada ( $\text{J}/\text{cm}^2$ );
- $D \rightarrow$  distância (mm) do ponto de arco elétrico até o trabalhador;
- $x \rightarrow$  fator de distância (tab. 3.5), 1,641 ( $0,208 < \text{tensão} < 1$  kV) ou 0,973 ( $5 < \text{tensão} < 15$  kV);
- $t \rightarrow$  tempo total de duração do arco (s).

### Distância de Segurança

Reorganizando a equação 3.8 pode-se determinar a distância segura, a qual a energia incidente não cause danos (queimaduras de 2º grau) ao indivíduo. Segundo [19] esse valor é  $1,2\text{cal}/\text{cm}^2$  para um tempo de exposição de 1s. A equação 3.9 apresenta o cálculo para a distância de segurança. Por último, essa distância será considerada a distância de aproximação segura para as pessoas, sem a utilização de medidas de proteção.

$$D_B = \left[ 4,184 \times Cf \times En \times \left( \frac{t}{0,2} \right) \times \left( \frac{610^x}{E_B} \right) \right]^{\frac{1}{x}} \quad (3.9)$$

- $D_B \rightarrow$  Distância de segurança (mm);
- $E_B \rightarrow$  Valor de energia incidente que não provoca queimadura do 2º grau –  $1,2 \text{ cal}/\text{cm}^2$ .

A metodologia IEEE-1584 requer maior número de informações para o cálculo da energia incidente, sendo assim mais onerosa que as apresentadas anteriormente. Contudo, os resultados alcançados são mais fidedignos aos valores verificados em testes, o que chancela a aplicação do método. Informações tais como, distâncias de trabalho, espaçamento entre condutores e tempos de abertura de disjuntores, podem ser trabalhosas de se obter, contudo, a metodologia oferece valores típicos que podem ser utilizados, caso não seja possível conseguir esses dados em campo.

Algumas conclusões importantes da metodologia IEEE são:

- A energia incidente é proporcional ao tempo de duração do arco;
- A energia incidente medida a uma dada distância do arco elétrico decai exponencialmente à medida que se afasta do arco. O expoente da distância irá depender da geometria do

encapsulamento;

- A inclusão do tipo de aterramento proporcionou uma melhora no coeficiente de determinação ( $R^2$ ) do modelo em 1%.
- A relação X/R, frequência, composição dos eletrodos e outras variáveis que foram consideradas de início tiveram pouco ou nenhum efeito na corrente de arco e na energia incidente, sendo, portanto, desconsideradas;
- A corrente de arco depende primeiramente da corrente curto-circuito franco. O espaçamento entre os condutores, tensão e tipo de aterramento são fatores de menor importância;

A figura 3.8 apresenta um fluxograma para utilização da metodologia IEEE.

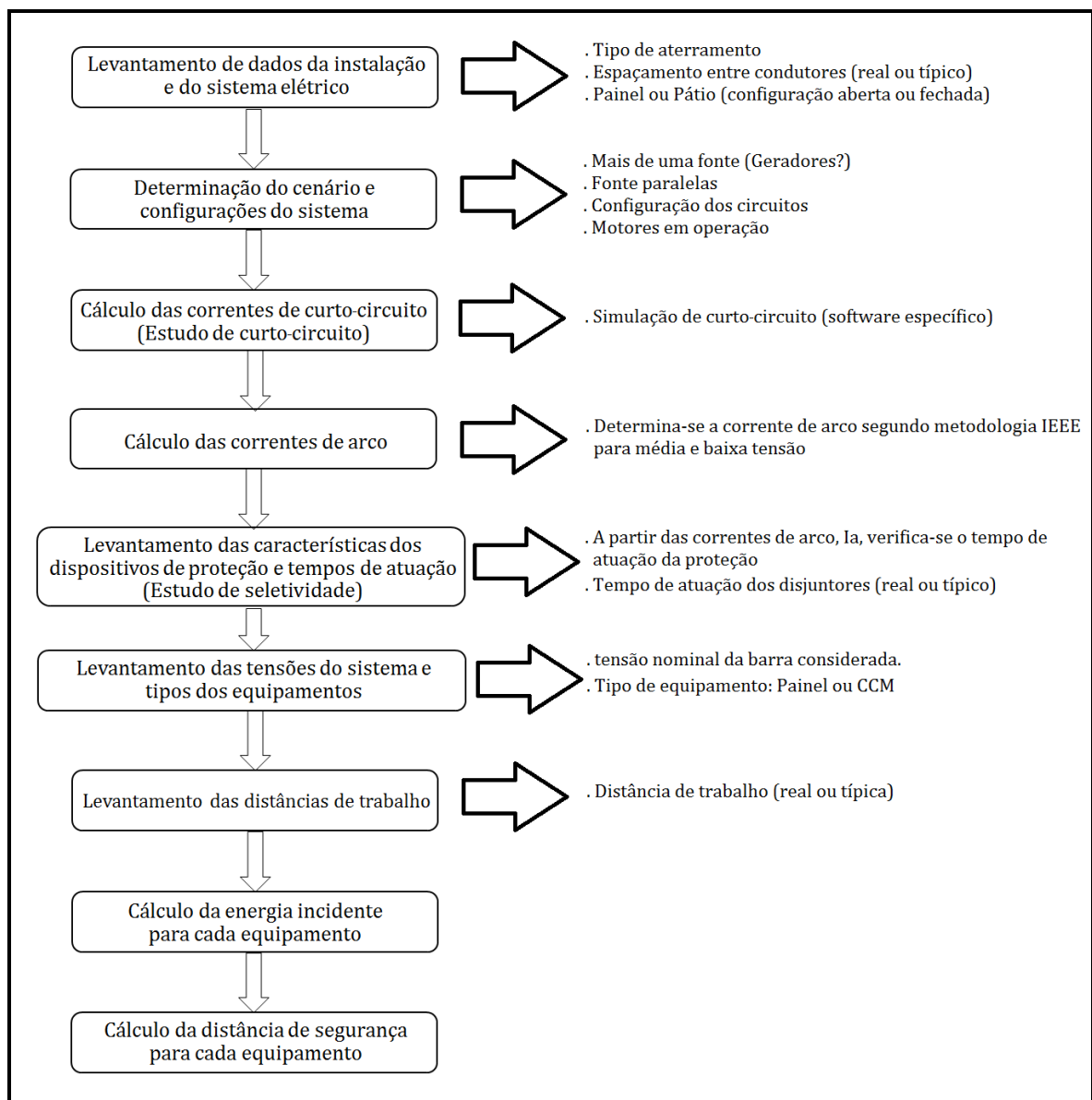


Figura 3.8 – Fluxograma para o cálculo da energia incidente segundo IEEE-1584

### 3.5 UTILIZAÇÃO DE SOFTWARES

Para sistemas com tensão superior a 15 kV não existe limitação em se utilizar o método de Ralph Lee para o cálculo da energia incidente, uma vez que o mesmo não oferece restrições quanto aos níveis de tensão. Entretanto os resultados alcançados com essa metodologia são demasiadamente conservadores, especialmente para média e alta tensão, sendo na prática não utilizados. Dessa forma, outros métodos de cálculo para sistemas de alta tensão foram desenvolvidos de forma a buscar resultados mais próximos dos valores reais.

Atualmente existem softwares que realizam o cálculo da energia incidente utilizando as equações de transferência de calor [21], com aplicações principalmente em sistemas de alta tensão. Em [5] é citado o método ArcPro, desenvolvido pela empresa Kinectrics, como uma opção para os cálculos em média, alta e extra alta tensão, até 800 kV. O NESC (C2, Seção 410, tabelas 410-1 e 410-2) também oferece referências de energia incidente em alta tensão, tendo como arcabouço o método ArcPro. Trata-se do método que mais se aproxima da realidade do Sistema Elétrico de Potência [21]. Outra opção disponível no mercado é o software Duke Power Heat Flux Calculator que fornece bons resultados para configurações abertas, em alta e extra alta tensão. O Heat Flux oferece a vantagem de ser um software gratuito e disponível na internet, o que facilita a sua utilização.

Haja vista o destaque do método ArcPro dados pela OSHA e pelo NESC, segue algumas considerações sobre o mesmo. A modelagem do arco elétrico é feita como sendo de característica unidimensional, simétrico ao eixo dos eletrodos e de queima livre. A figura 3.9 ilustra essa modelagem. A figura 3.10 mostra a janela de entrada de dados do software.

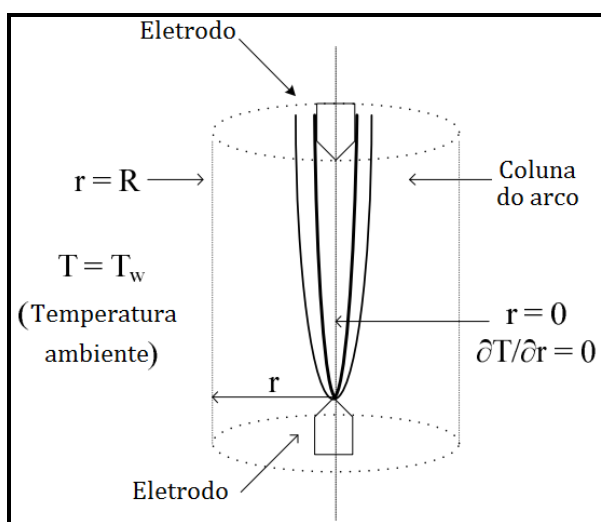


Figura 3.9 – Modelo do arco elétrico pelo ArcPro - Adaptado de [22]

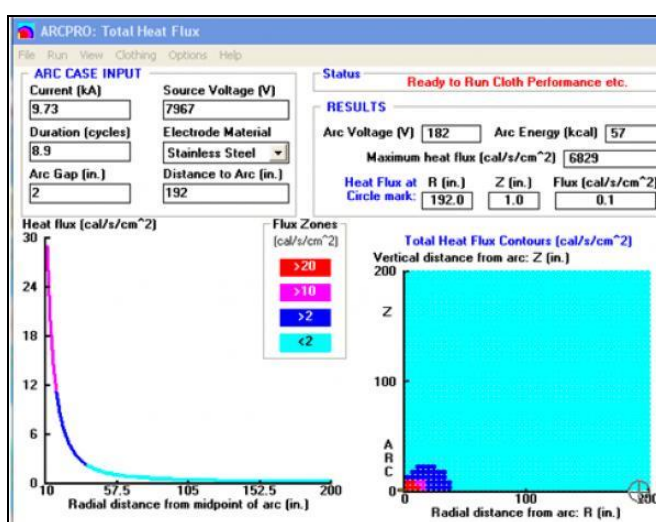


Figura 3.10 – Entrada de dados - Software ArcPro – Fonte [23]

Considerando um equilíbrio termodinâmico, a temperatura e o campo elétrico são determinados pela equação do balanço de energia, equação 3.10. A corrente e tensão de arco são determinados, pelas equações 3.11 e 3.12, respectivamente.

$$\frac{\Delta T}{\Delta t} \approx \frac{\sigma E^2}{\rho C_p} - \frac{U}{\rho C_p} + \frac{1}{\rho C_p} \left[ \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} \left( r \cdot \eta \frac{\partial T}{\partial r} \right) \right] \quad (3.10)$$

$$I_{arc} = E \int_0^R \sigma 2\pi r dr \quad (3.11)$$

$$V_{arc} = E(L) + V_{electrode} \quad (3.12)$$

Onde:

- $E \rightarrow$  Campo elétrico na coluna do arco (V/m);
- $L \rightarrow$  Comprimento do arco (m);
- $V_{arc} \rightarrow$  Tensão de arco (V);
- $V_{electrode} \rightarrow$  Tensão no eletrodo (queda de tensão no catodo mais a queda de tensão no anodo) (V);
- $r \rightarrow$  distância radial do arco ao ponto (m);
- $\sigma \rightarrow$  Condutividade do gás (S/m);
- $I_{arc} \rightarrow$  Corrente de arco (A);
- $t \rightarrow$  tempo de duração do arco (s);
- $T \rightarrow$  Temperatura (K);
- $\rho \rightarrow$  Densidade do gás (kg/m<sup>3</sup>);
- $C_p \rightarrow$  Calor específico do gás à pressão constante (J/K·kg);
- $U \rightarrow$  Calor transferido por radiação do arco para a vizinhança (W/m<sup>3</sup>);
- $\eta \rightarrow$  Condutividade térmica do gás (W/m·K).

O software considera o aquecimento gerado pela passagem da corrente elétrica compensado pela energia que sai do arco, na forma de radiação e convecção [22]. A tensão de arco depende, a princípio, do espaçamento entre os eletrodos e da corrente de arco. Considerando as formas de onda da tensão e corrente como puramente senoidais (na realidade contêm harmônicas) e a impedância do arco puramente resistiva, a energia total dissipada no arco pode ser aproximada pela equação 3.13.

$$E_{arc} = \int_0^t P_{arc} dt = \int_0^t V_{arc} \cdot I_{arc} dt = V_{arc} \cdot I_{arc} \cdot t \quad (3.13)$$

A equação 3.13 fornece a energia total produzida, considerando as duas formas de contribuição, radiação e convecção.

O ambiente do SEP possui características dinâmicas, onde variam a distância entre fases, níveis de tensão, correntes de curto-circuito e tempo de atuação da proteção. Esse cenário, com parâmetros variáveis, é melhor avaliado pela modelagem proposta pelo ArcPro [21]. Para efetuar o cálculo, o arco é modelado pontualmente na origem e a partir da distância formada pela superfície da esfera a uma dada distância, determina-se a energia.

A tabela 3.6 apresenta os resultados utilizando o método ArcPro para os níveis de tensão de 72,6 a 800 kV, para faltas monofásicas em configurações abertas. A energia incidente é função da corrente de falta e do tempo de abertura, como já verificado pelas metodologias anteriores.

Tabela 3.6 – Energia incidente para vários valores de corrente de falta monofásicas – Adaptado de [5]

Tensão (kV)	D <sub>mín</sub> * (m)	I <sub>FALTA</sub> (kA)	Energia Incidente (cal/cm <sup>2</sup> )			
			4	5	8	12
			Tempo extinção (ciclos)			
72,6 a 121,0	1,02	20	10	12	20	30
		30	6	7	11	17
		40	4	5	7	11
		50	3	3	5	8
121,1 a 145,0	1,16	20	12	15	24	35
		30	7	9	15	22
		40	5	6	10	15
		50	4	5	8	11
145,1 a 169,0	1,30	20	12	15	24	36
		30	7	9	15	22
		40	5	7	10	16
		50	4	5	8	12
169,1 a 242,0	1,72	20	13	17	27	40
		30	8	10	17	25
		40	6	7	12	17
		50	4	5	9	13
242,1 a 362,0	2,76	20	25	32	51	76
		30	16	19	31	47
		40	11	14	22	33
		50	8	10	16	25
362,1 a 420,0	2,50	20	12	15	25	37
		30	8	10	15	23
		40	5	7	11	16
		50	4	5	8	12
420,1 a 550,0	3,62	20	23	29	47	70
		30	14	18	29	43
		40	10	13	20	30
		50	8	9	15	23
550,1 a 800,0	4,83	20	25	31	50	75
		30	15	19	31	46
		40	11	13	21	32
		50	8	10	16	24

\* Distâncias mínimas por nível de tensão para garantir os valores de energia incidente determinados pelo ArcPro



O programa ArcPro fornece, em seu guia de usuário, fatores de ajustes que permitem converter os resultados da tabela 3.6 para curtos-circuitos trifásicos e também para configurações fechadas, proporcionando maior abrangência do método. Para determinar os valores para faltas trifásicas é proposto um fator de correção de 1,5 [22], como uma primeira aproximação. Entretanto esse fator pode variar entre 1,2 e 2,2 [22]. Para encontrar os valores para faltas trifásicas em configurações fechadas é proposto um fator entre 3,7 e 6,5. Em alguns casos o guia faz referência a própria NFPA-70E [4] para utilização de fatores de correção. Cabe aqui ressaltar a dificuldade em se determinar fatores de correção, uma vez que os testes realizados em laboratório já indicaram uma variedade de resultados, apresentando fatores de até 12,2 [14].

Cabe ressaltar que embora a utilização do ArcPro ofereça um modelo altamente sofisticado, os resultados são um mecanismo auxiliar para a definição da proteção adequada para as pessoas e existem limitações que devem ser levadas em conta para o seu uso. Deve-se avaliar o movimento do arco elétrico, tipo de falta (monofásica ou trifásica), efeitos de ambientes fechados e abertos, efeitos do vento, etc. [21]. Não obstante, trata-se atualmente do principal recurso para o cálculo de energia incidente em alta e extra alta tensão.

### **3.6 CONCLUSÃO**

As metodologias apresentadas ao longo do capítulo, foram expostas em ordem cronológica, e são as principais técnicas de cálculo de energia incidente. No segmento industrial o método IEEE [10] e o método de Doughty-Neal [14] têm maior utilização e apresentam resultados bastante parecidos para tensões até 600 V. As duas metodologias podem ser utilizadas em configurações abertas e fechadas. Entre 600 V e 15 kV o método IEEE aparece como principal forma de determinar a energia incidente. Ressalta-se que a faixa para as correntes de curto-circuito é mais ampla no método IEEE (0,7 a 106 kA) que no método de Doughty-Neal (16 a 50 kA), o que aumenta seu universo de aplicação [10]. O método de Ralph Lee apresenta bons resultados até 600 V, porém somente para configurações abertas. Cabe frisar que as boas práticas de saúde e segurança em eletricidade têm levado cada vez mais à produção de equipamentos elétricos encapsulados, especialmente pelos riscos associados à eletrocussão. Essa tendência impele os fabricantes, projetistas e profissionais da área a atentar para os riscos relativos ao arco elétrico em configurações fechadas.

Para instalações elétricas aéreas, subestações desabrigadas, linhas de transmissão e para o SEP em geral, os métodos de Doughty-Neal e IEEE não são recomendados, restringidos pelos próprios limites de aplicação. Nesses casos os métodos utilizando softwares específicos são mais indicados. O software ArcPro se destaca como uma referência para esse segmento, sendo utilizado

pela OSHA e também pelo NESC para avaliação dos níveis de energia incidente em alta e extra alta tensão.

Abaixo segue uma visão condensada das metodologias apresentadas. A tabela 3.7 apresenta um quadro resumo dos métodos de cálculo e a tabela 3.8 mostra os limites de aplicação de cada um, de acordo com o nível de tensão, tipo de falta e configuração dos condutores (aberto ou fechado) [5]. A tabela 3.7 apresenta também, a título de informação, um método de cálculo para sistemas de corrente contínua acima de 1000 V.

Tabela 3.7 – Quadro resumo dos métodos de cálculo – Adaptado de [4]

Método	Limitações / Parâmetros
Ralph Lee, "The Other Electrical Hazard: Electrical Arc Flash Burns"	Calcula a energia incidente e a distância de segurança do arco elétrico em configurações abertas; conservadora para tensões acima de 600 V e se torna ainda mais conservadora à medida que a tensão aumenta
Doughty-Neal, "Predicting Incident Energy to Better Manage the Electrical Arc Hazard on 600 V Power Distribution Systems"	Calcula a energia incidente para arcos trifásicos em sistemas até 600 V; aplica-se a correntes de curto-circuito entre 16 kA e 50 kA
IEEE 1584, <i>Guide for Performing Arc Flash Calculations</i>	Calcula a energia incidente e a distância de segurança do arco elétrico para: 208 V a 15 kV; trifásico; 50 Hz a 60 Hz; corrente de curto-circuito de 700 a 106.000 A; e espaçamento entre condutores de 13 mm a 152 mm
ANSI/IEEE C2 NESC-Section 410 Tables 410-1 and Table 410-2	Calcula a energia incidente de arco fase-terra em configurações abertas para: 1 kV a 500 kV para trabalhos em linha viva. (Baseado na metodologia ArcPro)
Doan, "Arc Flash Calculations for Exposure to DC Systems"	Calcula a energia incidente para sistemas acima de 1000 Vdc

Tabela 3.8 – Limites de aplicação dos métodos – Adaptado de [5]

Método de Cálculo da Energia Incidente	Até 600 V <sup>1</sup>			601 V a 15 kV <sup>1</sup>			Maior que 15 kV		
	1Φ	3Φa	3Φb	1Φ	3Φa	3Φb	1Φ	3Φa	3Φb
Ralph Lee	S-C	S	N	S-C	S-C	N	N <sup>2</sup>	N <sup>2</sup>	N <sup>2</sup>
Doughty-Neal	S-C	S	S	N	N	N	N	N	N
IEEE 1584	S	S	S	S	S	S	N	N	N
ArcPro	S	N	N	S	N	N	S	S	S

1Φ: Monofásico - configuração aberta

3Φa: Trifásico - configuração aberta

3Φb: Trifásico - configuração fechada (box)

S: Resultado aceitável para o tipo de arco elétrico

N: Resultado não aceitável para o tipo de arco elétrico

S-C: Resultado aceitável para o tipo de arco elétrico porém muito conservador

1 Para esse nível de tensão é considerado que as faltas monofásicas irão fatalmente evoluir para faltas trifásicas, a menos que possa ser demonstrado o contrário.

2 Embora esteja dentro dos limites de aplicação do método de Ralph Lee, os resultados são extremamente conservadores e irrealistas.

## **CAPÍTULO 4**

### **VESTIMENTAS ANTICHAMA**

#### **4.1 INTRODUÇÃO**

Dentre os riscos associados à realização de atividades em instalações elétricas energizadas está a exposição dos trabalhadores à possibilidade de ocorrência de arcos elétricos, conforme descrito no capítulo 1. Segundo [24], a utilização de Equipamentos de Proteção Individual (EPI) é a última medida da hierarquia de controle dos riscos, porém, nos casos em que a análise de risco determinar ser obrigatória a utilização de EPI, esse deve ser especificado adequadamente ao risco existente em cada atividade.

De acordo com [25] e [26] é de responsabilidade das empresas a especificação e a aquisição de equipamentos de proteção, sendo da competência do Serviço Especializado em Engenharia de Segurança em Medicina do Trabalho, SESMT, e de profissionais especializados, sua apropriada recomendação.

Esse capítulo irá apresentar conceitos e definições relacionados às vestimentas de proteção contra os efeitos térmicos do arco elétrico. Tais vestimentas são caracterizadas como um EPI e são compostas de tecidos especiais com propriedades antichama. Normalmente esses tecidos passam por tratamentos químicos especiais e possuem gramatura superior às vestimentas comuns.

#### **4.2 TOLERÂNCIA DO TECIDO HUMANO ÀS QUEIMADURAS**

Pode-se definir queimadura como o quadro resultante de ação térmica direta ou indireta sobre o organismo humano. As queimaduras representam ainda importante causa de mortalidade e de morbidade. A primeira ligada principalmente à infecção, com possível evolução para septicemia (infecção geral devido a multiplicação bacteriana), e a possíveis complicações de funcionalidade de órgãos vitais. A morbidade está relacionada ao desenvolvimento de deformidades e de sequelas que podem levar a incapacidade funcional, principalmente quando os membros superiores são atingidos [27].

Os fatores mais relevantes para se avaliar a gravidade de uma queimadura são a profundidade, a extensão, a localização, a idade da vítima, a existência de doenças prévias, a concomitância de condições agravantes e a inalação de fumaça. Destaca-se que os acidentes envolvendo arco elétrico podem levar uma vasta área do corpo humano à queimaduras de segundo e terceiro grau se medidas de proteção adequadas não forem aplicadas.

Isto posto, é proveitoso conhecer a área (em percentual da área total) de cada parte do corpo humano. Conforme exposto acima a extensão de uma queimadura pode definir a chance de

sobrevivência do indivíduo. Para essa divisão utiliza-se a regra dos nove de Wallace, válida para pessoas a partir de 10 anos [27]. A Figura 4.1 apresenta a divisão segundo essa regra.

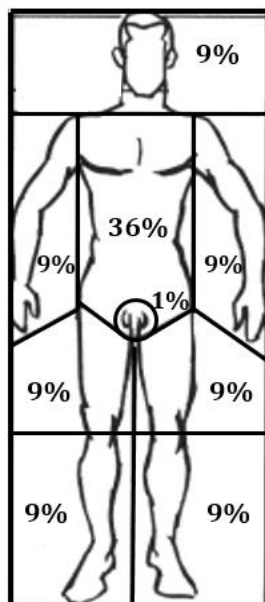


Figura 4.1 – Regra dos Nove de Wallace – Percentual da superfície corporal para os membros do corpo Adaptado de [27].

A profundidade da queimadura pode ser avaliada em graus, conforme figura 4.2, sendo determinante no resultado estético e funcional da pele. A profundidade irá depender da intensidade e tipo do agente térmico bem como do tempo de exposição da pele ao calor. Para se avaliar a gravidade do dano causado por uma queimadura, são consideradas apenas as áreas afetadas por queimaduras com profundidade de segundo e terceiro graus.

Primeiro grau	Segundo grau	Terceiro grau
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Compromete apenas a epiderme</li> <li>• Apresenta eritema, calor e dor</li> <li>• Não há formação de bolhas</li> <li>• Evolui com descamação em poucos dias</li> <li>• Regride sem deixar cicatrizes</li> <li>• Repercussão sistêmica é desprezível</li> <li>• Não é considerada na avaliação da área atingida</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Compromete totalmente a epiderme e parcialmente a derme</li> <li>• Apresenta dor, eritema, edema, bolhas, erosão ou ulceração</li> <li>• Há regeneração espontânea</li> <li>• Ocorre reepitelização a partir dos anexos cutâneos (folículos pilosos e glândulas)</li> <li>• Cicatrização mais lenta (24 semanas)</li> <li>• Pode deixar sequelas: discromia (superficial); cicatriz (profunda)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Destrói todas as camadas da pele, atingindo até o subcutâneo, podendo atingir tendões, ligamentos, músculos e ossos</li> <li>• Causa lesão branca ou marrom, seca, dura, inelástica</li> <li>• É indolor</li> <li>• Não há regeneração espontânea, necessitando de enxertia</li> <li>• Eventualmente pode cicatrizar, porém com retração das bordas</li> </ul>

Figura 4.2 – Classificação das queimaduras de acordo com a profundidade - Adaptado de [27]

Nos trabalhos referentes às queimaduras no corpo humano, destaca-se o progresso alcançado por duas pesquisadoras em especial, Stoll e Chianta. Desde os primeiros estudos realizados pelas mesmas, no fim dos anos 1950 e início dos anos 1960, muitos trabalhos de pesquisa e desenvolvimento vêm sendo elaborados e formaram a base para normas, guias e padrões utilizados mundialmente.

O referido trabalho estabeleceu a correlação entre a elevação de temperatura suportável pelo corpo humano e o tempo de exposição à fonte de calor. Essa correlação ficou mais conhecida como Curva de Stoll, tornando-se um arcabouço para testes de suportabilidade térmica da pele em diferentes contextos, tornando-se uma referência internacional para ensaios de vestimentas resistentes ao calor. A pesquisa de Stoll e Chianta é referência para padrões como a ASTM, *American Society for Testing and Material*, e NFPA, *National Fire Protection Association*.

### 4.3 FABRICAÇÃO DE VESTIMENTAS

A NFPA 70E, *Standard for Electrical Safety in the Workplace*, é um padrão americano que apresenta os requisitos para práticas seguras de trabalho em eletricidade que foram estabelecidos pelo *Technical Committee on Electrical Safety in the Workplace*. Os requisitos para os equipamentos de proteção individual, indicados na NFPA 70E, incluindo as vestimentas antichama, remetem às normas de ensaio de fabricação estabelecidas pela ASTM [15].

Em alternativa, no âmbito internacional, os requisitos para EPI contra efeitos térmicos do arco elétrico são estabelecidos pela IEC, *International Electrotechnical Commission*, em colaboração com a ISO, *International Organization for Standardization*. A Tabela 4.1 mostra os normativos internacionais.

Tabela 4.1 – Normativos Internacionais - Adaptado de [29]

Nível	EUA	Internacional	Europa	França
Normas de segurança	NFPA 70E	-	EN 50110	NF C-18510
Normas de produtos	ASTM ANSI	IEC ISO	EN	NF EN

Os normativos americanos e internacionais apresentam similaridades entre si e apresentam padrões que estabelecem os requisitos de ensaio e certificação bem como determinam os métodos de avaliação dos materiais, conforme mostra a Figura 4.3.

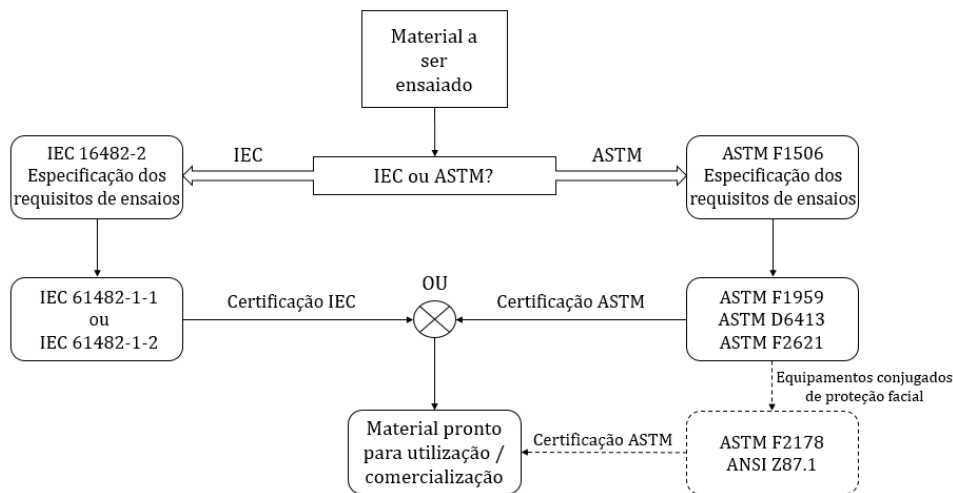


Figura 4.3 – Relação entre especificações e métodos de teste para equipamentos de proteção - Adaptado de [30].

Considerando o padrão americano, destacam-se as normas ASTM F1506 e ASTM F1959. O padrão F1506 determina os requisitos mínimos de ensaios para desempenho das vestimentas de proteção enquanto o F1959 estabelece a metodologia de teste, que traz como requisito, por exemplo, a exigência que os ensaios sejam realizados com pelo menos 20 amostras do tecido. O ensaio da vestimenta avalia o seu desempenho térmico durante um evento com arco elétrico. Define-se então alguns indicadores de performance, que serão considerados para avaliar a capacidade de proteção térmica da vestimenta. De forma elementar a vestimenta nada mais é que um isolante térmico, sendo que quanto maior a capacidade de isolamento, melhor será o desempenho da vestimenta. Os índices de performance são: Flamabilidade (ou Ignition<sub>50</sub>), ATPV (*Arc Thermal Performance Value*) e HAF (*Heat Attenuation Factor*), definidos abaixo [31].

- Flamabilidade (Ignition<sub>50</sub>): valor de energia incidente na amostra que resulta numa probabilidade de 50% da camada interna do tecido ou material entrar em ignição;
- ATPV: valor de energia incidente que resulta numa probabilidade de 50% de que o calor transferido através da amostra do material provoque o início de uma lesão de pele com queimadura de segundo grau, com base na curva de Stoll;
- HAF: definido como a porcentagem da energia incidente bloqueada pela amostra do material quando submetido a um nível de energia incidente igual ao ATPV. O índice HAF é conhecido também como fator de atenuação de calor.

Dentre os indicadores citados acima, destaca-se o ATPV. No Brasil, por exemplo, a determinação do ATPV da vestimenta é premissa para se obter o certificado de aprovação (CA) do Ministério do Trabalho. Essa certificação é requisito para a vestimenta ser considerada EPI. O

ensaio para determinação do ATPV, em  $\text{cal/cm}^2$  ou  $\text{J/cm}^2$ , consiste na avaliação da resposta de transporte de calor em relação à curva de Stoll, expressa pela equação 4.1 [31].

$$\text{Stoll\_Response}(\text{cal/cm}^2) = 1,1991 \cdot t_i^{0,2901} \quad (4.1)$$

onde  $t_i$  é o tempo, em segundos, decorrido desde o início da exposição ao arco e o termo *Stoll\_Response* representa o valor de energia incidente (em  $\text{cal/cm}^2$ ) suportável pela pele sem sofrer queimaduras do 2º grau para o tempo  $t_i$ .

Para a determinação do ATPV os testes são feitos segundo roteiro definido [31]. Durante o arco elétrico mede-se o valor da energia incidente antes e após a passagem pelo tecido. Cada valor medido nos sensores, internos à vestimenta, é comparado ao valor obtido pela equação 4.1, de acordo com o tempo de duração do arco. Se a qualquer momento o valor medido exceder a curva de Stoll, entende-se que houve queimadura de 2º e o valor 1 (ou 100%) é registrado. Caso a energia medida não ultrapasse a curva de Stoll, considera-se que não houve queimadura do 2º e registra-se o valor 0 (ou 0%). Esse processo deve ser repetido pelo menos com 20 amostras, com valores de energia incidente crescentes. A partir dos resultados é aplicada uma ferramenta estatística, chamada regressão logística nominal, para gerar uma curva P x EI (Probabilidade de queimaduras do 2º versus energia incidente sobre o tecido). Uma vez obtida a curva, define-se o ATPV como o valor de energia incidente correspondente a probabilidade de 50% de queimadura do 2º. Abaixo as figuras 4.4 e 4.5 mostram, respectivamente, a curva de Stoll e um ensaio realizado em três amostras distintas. A figura 4.6 apresenta a curva de probabilidade obtida após ser feita a regressão com as amostras iniciais. O valor do ATPV nesse caso foi de  $8 \text{ cal/cm}^2$ .

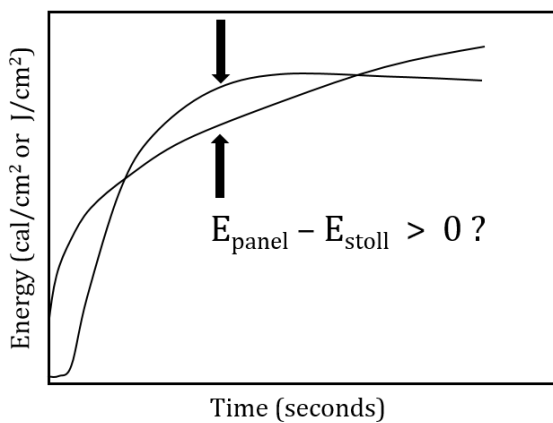


Figura 4.4 – Referência de Stoll – Adaptado de [32]

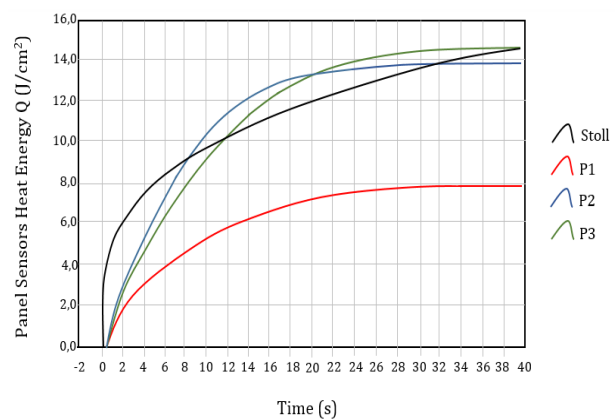


Figura 4.5 – Exemplo de ensaio baseado na curva de Stoll Adaptado de [32]

Se durante a realização do ensaio ocorrerem danos no material evidenciados por um ou mais orifícios, que permitam a passagem de energia térmica, diz-se que ocorreu *breakopen*. Análogo ao

ensaio para a determinação do ATPV, há também um teste para a determinação da energia de *breakopen*. A energia incidente que resulta em 50% de probabilidade de ocorrência de *breakopen* é chamada *breakopen threshold energy*, *EBT* (J/cm<sup>2</sup> ou cal/cm<sup>2</sup>). Cabe destacar que o valor de resistência ao arco que deve ser informado na vestimenta é o menor valor entre o ATPV e o EBT, segundo [31].

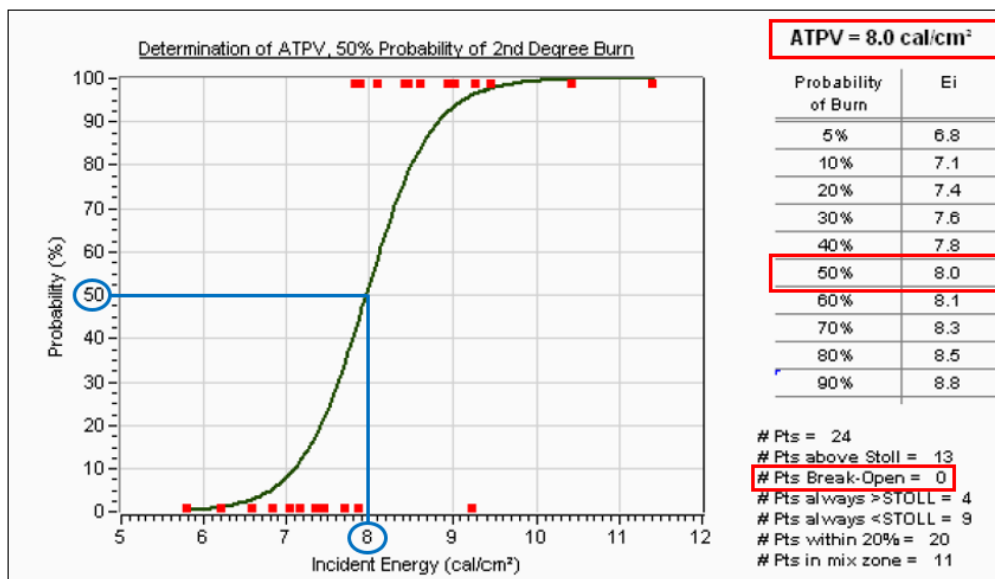


Figura 4.6 – Exemplo de ensaio de determinação de ATPV - Adaptado de [29]

A sensibilidade de desempenho da vestimenta ao valor de energia incidente pode ser observada no exemplo da figura 4.6. Nota-se como pequenas variações nos níveis de energia incidente levam a grandes variações na probabilidade de queimaduras. Nesse caso, por exemplo, verifica-se que variações da ordem de 10% no valor da energia incidente, para mais ou para menos, correspondem a valores de probabilidade de ocorrência de queimaduras de segundo grau de 90% e 10%, respectivamente. Esse comportamento torna-se um elemento relevante no momento de se especificar a vestimenta.

Ressalta-se ainda que a inclinação da curva pode variar de acordo com o tipo de tecido, se tratamento químico recebido ou inerente, a gramatura e o número de camadas e, por isso, existem vestimentas ainda mais sensíveis à variação do valor de energia incidente.

Outros padrões ASTM de proteção contra o arco elétrico, apresentados na figura 4.3, são:

- ASTM D6413, teste de flamabilidade vertical que avalia a amostra de tecido novo e após 25 lavagens;
- ASTM F2621, complementar a ASTM F1959, avalia o EPI pronto (como será utilizado pelo trabalhador);



- ASTM F2178, avalia os EPI conjugados de proteção facial, como capacete e protetor facial integrados. Para avaliação de propriedades como raios UVA/UVB, usa como referência também a ANSI Z87.1 [15]

Similarmente ao padrão americano, os requisitos internacionais para proteção contra arco elétrico, são estabelecidos pela IEC 61482-2 e dois métodos de avaliação são permitidos: IEC 61482-1-1 e IEC 61482-1-2. O IEC 61482-1-1 é chamado de método do arco “aberto” (*‘open’ arc method*) e utiliza dois métodos para avaliação das vestimentas. O método A determina o ATPV, o HAF e o rompimento do tecido (*break open*). O método B avalia a vestimenta a partir do teste em manequim instrumentado. A IEC 61482 1-2 é chamada de método da caixa (*box test*) e classifica os materiais ensaiados de acordo com a corrente de arco aplicada: se o tecido passar no ensaio de 4 kA é certificado como classe 1 e se passar no ensaio de 7 kA é certificado como classe 2.

Os requisitos para EPI contra o fogo repentino são diferentes dos requisitos para arco elétrico, uma vez que as fontes de calor possuem características diferentes, conforme apresentado na tabela 2.1. Para fogo repentino os normativos são: NFPA 2112, ASTM F1930 e ASTM D6413 e, de maneira similar, ISO 11612, ISO 13506 e ISO 15025 [15].

#### 4.4 ESPECIFICAÇÃO DE VESTIMENTAS

A NFPA 70E define *arc rating* como sendo o valor, em cal/cm<sup>2</sup>, que descreve o desempenho de um material à exposição de arco elétrico. Esse valor deve ser informado na vestimenta antichama e corresponde ao menor valor encontrado no teste da ASTM F1959 dentre o ATPV e o EBT, conforme citado anteriormente.

A partir da revisão de 2015, a NFPA 70E passou a utilizar o termo Categoria de EPI no lugar de Categoria de Risco e a Categoria 0 não está mais presente. Com base na NFPA, as categorias de EPI determinam faixas de desempenho das vestimentas de acordo com o valor de energia incidente indicado, conforme mostra a Figura 4.7.

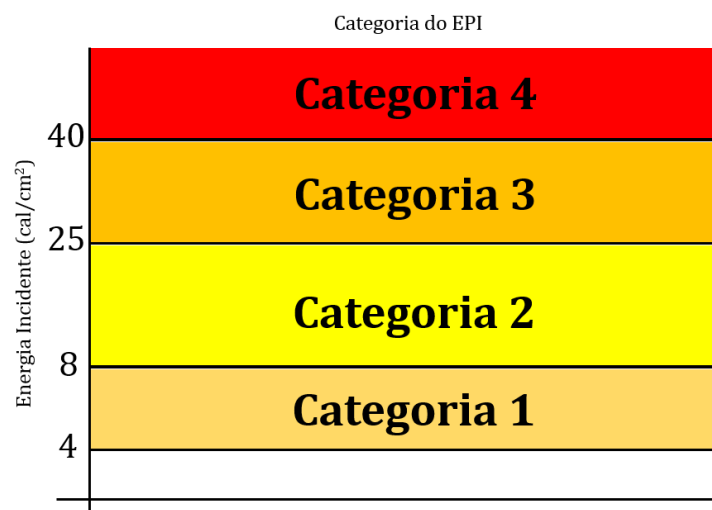


Figura 4.7 – Categoria do EPI - Tabela 130.7 (C)(16) de [4]

A Figura 4.8 ilustra a identificação do *arc rating* na vestimenta antichama. É mostrado o valor do ATPV que se enquadra na Categoria 2 de EPI.



Figura 4.8 – Identificação de nível de ATPV em vestimenta antichama - Imagem de internet. Adaptado de [33]

A seleção de EPI contra arco elétrico pode ser feita baseada na análise do valor de energia incidente ou utilizando as tabelas (artigo 130) da NFPA 70E [4].

Para especificação da vestimenta antichama através da análise da energia incidente da instalação, o método de cálculo deve ser escolhido conforme padrões de referência apresentados no Capítulo 3.

A prática usual é que se especifique a vestimenta com o valor de ATPV maior ou igual ao valor de energia incidente calculado [4]. Contudo, conforme apresentado na figura 4.6, um valor de energia incidente da instalação de 8 cal/cm<sup>2</sup>, para um ATPV da vestimenta de mesmo valor, oferece uma probabilidade de 50% de ocorrência de queimaduras de segundo grau. Essa constatação sugere especificar vestimentas com ATPV maior que a energia incidente da instalação, haja vista a relação direta entre a área do corpo queimada e o risco de fatalidade.

De acordo com o trabalho da *National Burn Repository Report* [6], existe uma relação estatística entre a extensão de queimadura no corpo, em termos percentuais, e a probabilidade de mortalidade por faixa etária, conforme detalhado na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 – Taxa de mortalidade por faixa etária x percentual de queimaduras - Adaptado de [6].

Age Group	Burn Size (% TBSA)										Total
	0.1 - 9.9	10 - 19.9	20 - 29.9	30 - 39.9	40 - 49.9	50 - 59.9	60 - 69.9	70 - 79.9	80 - 89.9	> 90	
Birth - .9	0.0	0.6	3.4	6.9	15.7	13.8	68.4	42.9	41.2	40.0	0.8
Died/Total	3/6940	7/1194	9/261	9/130	8/51	4/29	13/19	9/21	7/17	2/5	71/8667
1 - 1.9	0.0	0.4	0.6	1.0	8.5	22.2	19.2	22.2	20.0	60.0	0.2
Died/Total	0/11585	7/1954	2/311	1/101	4/47	4/18	5/26	2/9	1/5	3/5	29/14061
2 - 4.9	0.1	0.1	0.3	3.6	7.3	16.7	22.9	21.1	50.0	65.0	0.7
Died/Total	13/9597	2/1628	1/377	7/193	8/109	12/72	11/48	4/19	15/30	13/20	86/12093
5 - 15.9	0.1	0.3	0.9	1.6	4.4	2.9	10.3	11.7	48.9	61.5	0.6
Died/Total	12/12962	7/2166	6/637	5/308	8/182	3/103	9/87	7/60	23/47	16/26	96/16578
16 - 19.9	0.1	0.3	1.5	2.4	2.8	6.3	18.8	29.6	54.8	71.1	1.0
Died/Total	10/6844	4/1303	6/392	4/167	3/109	4/63	9/48	8/27	17/31	27/38	92/9022
20 - 29.9	0.2	0.5	1.6	5.1	10.5	16.8	26.9	41.5	59.6	80.6	1.4
Died/Total	34/20082	20/3936	20/1233	27/526	31/295	29/173	39/145	39/94	59/99	83/103	381/26686
30 - 39.9	0.3	1.0	2.5	7.1	11.5	17.5	33.6	47.4	69.2	91.8	2.0
Died/Total	44/16487	33/3412	27/1075	38/536	33/287	28/160	44/131	46/97	63/91	90/98	446/22374
40 - 49.9	0.5	1.3	4.5	10.2	22.9	40.2	39.9	55.8	78.7	86.7	2.8
Died/Total	87/17981	50/3805	55/1214	60/589	74/323	82/204	55/138	43/77	85/108	104/120	695/24559
50 - 59.9	0.9	3.1	10.2	22.0	38.7	52.8	64.6	74.0	83.7	87.7	4.8
Died/Total	143/15287	100/3207	105/1033	103/468	115/297	93/176	82/127	74/100	87/104	93/106	995/20905
60 - 69.9	1.9	6.0	19.3	39.4	55.3	65.6	91.5	90.0	95.1	94.1	7.5
Died/Total	168/8711	115/1904	118/610	122/310	94/170	82/125	65/71	54/60	39/41	48/51	905/12053
70 - 79.9	3.7	14.1	34.9	57.9	77.1	81.4	91.7	84.6	82.9	90.9	12.9
Died/Total	174/4681	151/1068	130/372	124/214	101/131	57/70	44/48	22/26	29/35	30/33	862/6678
80 or Greater	6.0	26.0	60.0	75.2	89.1	95.6	93.2	95.1	94.7	100.0	21.7
Died/Total	176/2949	203/782	180/300	121/161	82/92	65/68	41/44	39/41	36/38	35/35	978/4510
<b>Total</b>	<b>0.6</b>	<b>2.7</b>	<b>8.4</b>	<b>16.8</b>	<b>26.8</b>	<b>36.7</b>	<b>44.7</b>	<b>55.0</b>	<b>71.4</b>	<b>85.0</b>	<b>3.2</b>
<b>Died/Total</b>	<b>864/134106</b>	<b>699/26359</b>	<b>659/7815</b>	<b>621/3703</b>	<b>561/2093</b>	<b>463/1261</b>	<b>417/932</b>	<b>347/631</b>	<b>461/646</b>	<b>544/640</b>	<b>5636/178186</b>

De acordo com os dados apresentados, se um indivíduo entre 40 e 49 anos, por exemplo, tiver 50% da superfície do corpo atingida por queimaduras de segundo e terceiros graus a probabilidade de vir a óbito é de 40,2%. Já para um indivíduo entre 60 e 69 anos essa probabilidade sobe para 65,6%.

Vale reforçar que normalmente em um evento com ocorrência de arco elétrico, como exemplificado na Figura 4.9, são atingidos face, membros superiores e parte do tronco o que corresponde a pelo menos 45% da superfície do corpo (regra dos nove de Wallace), conforme mostrado na Figura 4.9. Essa análise mostra a importância da correta especificação da vestimenta antichama, sob o risco de expor os colaboradores a um elevado risco de morte.



*Figura 4.9 – Evento com ocorrência de arco elétrico – Fonte [34]*

## **4.5 CONCLUSÃO**

Embora as ações de eliminação e mitigação de riscos devam ser priorizadas na gestão de saúde e segurança, a utilização de vestimentas antichama adequadas é de suma importância no que diz respeito à prevenção dos riscos relacionados à energia incidente.

A especificação da vestimenta deve ser feita com base em uma análise fundamentada, onde deve ser levado em consideração a condição da instalação e as características de desempenho da vestimenta frente às variações de energia incidente

Mesmo que outros fatores possam interferir na ocorrência e gravidade de lesões, como localização e extensão de queimaduras e idade do indivíduo, deve-se ter em mente que a especificação de equipamentos de proteção é feita para um grupo de indivíduos e, por isso, deve ser a mais abrangente possível.

Por fim, é necessário que o indivíduo tenha conhecimento da obrigatoriedade da utilização de EPI específico para realização de cada atividade bem como da importância de seguir as recomendações de guarda e limpeza definidas pelo fabricante, uma vez que a má conservação pode interferir no desempenho do equipamento de proteção individual.

# CAPÍTULO 5

## REGULAMENTAÇÃO

### 5.1 INTRODUÇÃO

A evolução sobre as práticas de trabalho e métodos de gerenciamento de riscos levou à aprovação de leis, criação de padrões e de normas para segurança de trabalhos em eletricidade no Brasil e no mundo. A Tabela 5.1 mostra o desenvolvimento nas áreas técnicas e de saúde e segurança ocupacional.

Tabela 5.1 – Evolução no conhecimento do arco elétrico e métodos de gerenciamento de risco - Adaptado de [14]

ANO	DESENVOLVIMENTO
1981	Modelamento teórico (Lee)
1981 - Hoje	Avanço crescente no conhecimento baseado em modelos teóricos e experiência de campo
1990 - 1993	Inclusão dos itens S & R na OSHA 1910 (baseados em modelos teóricos)
1995	NFPA 70E – padrão sobre as práticas de trabalho e utilização de EPI baseado em modelos teóricos
1995 - 1998	Pesquisa e desenvolvimento na estimativa de energia incidente e avaliação na vestimenta de proteção retardante a chama
2004	Publicação de atualização da Norma Regulamentadora nº 10, NR-10

### 5.2 NORMAS INTERNACIONAIS

Em 1970, nos Estados Unidos, a *Occupational Safety and Health Act* (OSH Act) foi aprovada com o intuito de impedir que os trabalhadores sofressem ferimentos ou viessem a óbito em seus locais de trabalho, definindo ser de responsabilidade dos empregadores a garantia do local de trabalho seguro [5]. Essa lei criou a OSHA, *Occupational Safety and Health Administration*, que estabelece e aplica as normas de segurança no trabalho nos Estados Unidos.

No início dos anos 1990 foram incorporadas à OSHA1910, que estabelece os padrões de saúde e segurança ocupacional, as subpartes R e S que se referem, respectivamente, a Indústrias Especiais (incluindo Geração, Transmissão e Distribuição de Energia Elétrica) e Requisitos de Segurança Elétrica.

Embora a NFPA, *National Fire Protection Association*, tenha sido estabelecida em 1896, apenas após uma solicitação da OSHA os padrões para segurança elétrica no local de trabalho foram desenvolvidos. A NFPA 70E, aprovada pelo *American National Standards Institute* – ANSI,

ajuda empresas e trabalhadores a evitar acidentes e mortes devido a choque, eletrocussão, arco elétrico e explosão em decorrência de arco. Inclui ainda orientações sobre identificação e avaliação de riscos, seleção de EPI adequados, estabelecimento de condições de trabalho eletricamente seguras e o treinamento de funcionários [35].

No que diz respeito aos riscos associados ao arco elétrico, o padrão americano apresenta definições, avaliações de risco, distâncias de segurança e especificação de EPI, além de relacionar as categorias do EPI ao nível de *arc rating* mínimo, conforme mostrado no Capítulo 4.

### 5.3 NORMAS NACIONAIS

A portaria nº 3.214 de 08 de junho de 1978 aprovou no Brasil as Normas Regulamentadoras – NR – do Capítulo V, Título II, da Consolidação das Leis do Trabalho, relativas à Segurança e Medicina do Trabalho [36].

Dentre as NR aprovadas, estava a primeira versão da Norma Regulamentadora nº 10, NR-10, Instalações e Serviços de Eletricidade. Após pequenas alterações realizadas em 1983, somente em 2004 uma nova versão atualizada foi publicada, intitulada “Segurança em Instalações e Serviços em Eletricidade”.

A necessidade da atualização da NR-10 surgiu na década de 90, especialmente em 1998, quando se iniciou o processo de privatização do setor elétrico. O processo atingiu 80% da distribuição e 20% de geração, o que incorreu em significativas mudanças no processo e organização do trabalho no setor de energia elétrica.

A implementação de novas tecnologias em sistemas e equipamentos associada a alterações organizacionais, como a introdução da terceirização e do *downsizing*, trouxeram perdas aos trabalhadores que foram verificadas com o aumento do desemprego e da elevação do número de acidentes envolvendo eletricidade [37].

Diante da gravidade da situação e da pressão dos trabalhadores e sociedade, representados pela Comissão Tripartite Paritária Permanente – CTPP e pelo Grupo Técnico Tripartite de Energia – GTTE, o Ministério do Trabalho promoveu a atualização da norma.

Em 2001, o Ministério convocou um grupo de engenheiros eletricitas e de segurança do trabalho de diversas instituições e em 2002 a proposta inicial foi encaminhada para consulta pública.

O texto final da atualização, alinhado com os conceitos modernos de segurança e saúde em instalações e serviços com eletricidade, foi aprovado em novembro de 2003 e publicado através da Portaria MTE nº 598 de 7 de dezembro de 2004. A NR-28 estabelece os procedimentos para fiscalizações e penalizações decorrentes do não cumprimento das Normas Regulamentadoras.

Como foram concedidos prazos para o cumprimento de alguns itens da nova NR-10, sua vigência apenas se iniciou em dezembro de 2006, 24 meses após sua publicação. A norma entrou em vigor há 10 anos, mas ainda nos deparamos com situações de trabalho em desacordo com suas disposições e muitas dúvidas em relação à sua aplicação.

Apesar de representar grande avanço no que diz respeito aos serviços em eletricidade no Brasil, a NR-10 não faz menções claras e específicas a respeito dos perigos relacionados ao arco elétrico.

A NR-10 não faz definições nem mesmo apresenta avaliações de risco, de distância de segurança de arco nem mesmo a Norma Regulamentadora nº 6, Equipamentos de Proteção Individual – NR-6 faz especificação de EPI relacionados aos riscos associados ao arco elétrico. Deve-se atentar na NR-10, por exemplo, que os conceitos de zona livre e zona controlada apresentados na norma são aplicáveis para os riscos decorrentes apenas do choque elétrico, conforme apresentado na figura 5.1.

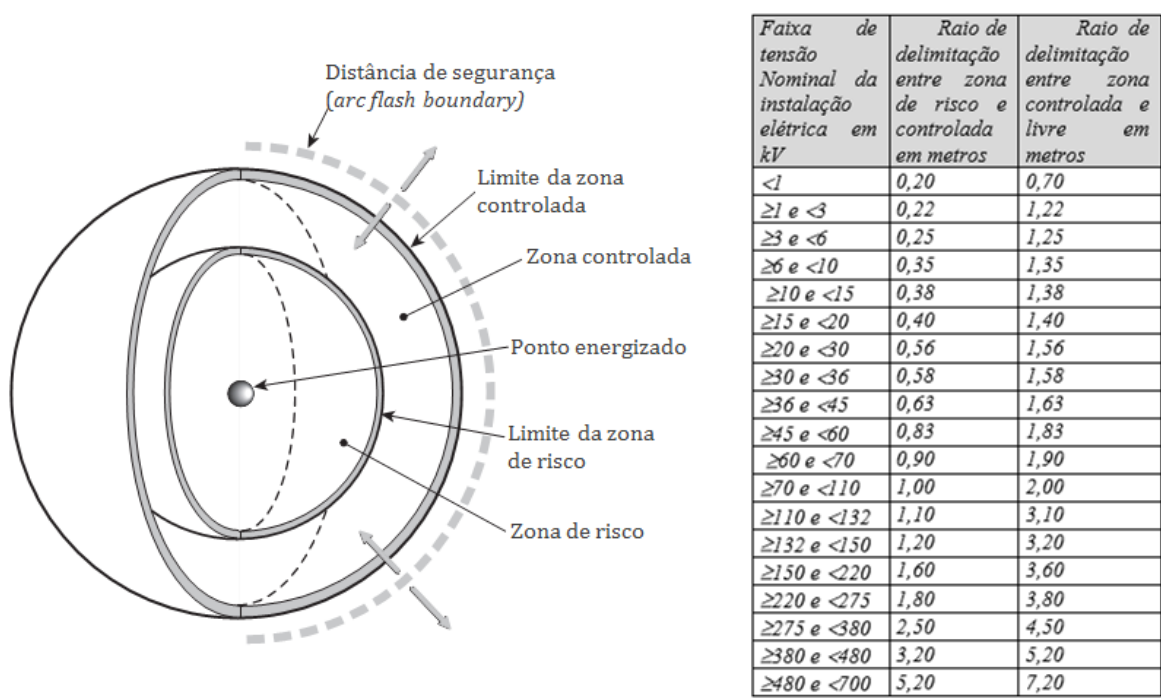


Figura 5.1 – Distância de segurança de arco e limites de aproximação – Adaptado de [4] e [26]

A NR-10 apresenta 3 itens que podem ser vinculados ao arco elétrico: a alínea (c) do item 10.2.4, o item 10.2.9.2 e alínea (a) do item 10.3.9. Os dois primeiros discorrem, dentre outras coisas, a respeito da especificação dos EPI e da adequação das vestimentas de trabalho quanto à inflamabilidade enquanto o último cita a especificação de características relativas à proteção contra queimaduras.

Segundo [37], uma adequada especificação de EPI deve ser o resultado de estudo da aplicação a que se destina e da instalação elétrica em que as atividades serão realizadas. Salienta também que a especificação do grau de proteção requerido pelas vestimentas destinadas a proteção contra efeitos térmicos dos arcos elétricos deve ser compatível com as atividades e com a potência de curto-circuito característica das instalações. A preocupação com as especificações de proteção contra queimadura visa garantir que foi realizada análise dos riscos associados às instalações e atividades e que medidas de controle e soluções de engenharia foram adotadas no projeto para preservação da saúde e segurança.

A NR-6, cita no Anexo I equipamentos de proteção contra agentes térmicos, mas não detalha quanto à sua especificação. Nos itens 6.5 e 6.6.1, alínea (a), a norma estabelece que compete à empresa, respectivamente, a recomendação e aquisição de EPI adequado ao risco existente em cada atividade [25]. Na alínea (c) do item 6.11.1 a norma define ser de competência do Ministério do Trabalho “estabelecer, quando necessário, os regulamentos técnicos para ensaios de EPI”.

O Ministério do Trabalho então, por meio da Portaria nº 121 de 30 de setembro de 2009, estabeleceu as “normas técnicas de ensaios e os requisitos obrigatórios aplicáveis aos Equipamentos de Proteção Individual – EPI enquadrados no Anexo I da NR-6” [38]. Nos anexos I e II da portaria são adotadas as especificações e métodos de ensaios para proteção contra agentes térmicos citadas em 5.2. Dessa maneira, os normativos americanos e internacionais devem ser atendidos nos ensaios e testes de EPI contra arco elétrico utilizados e comercializados no Brasil.

Iniciado em novembro de 2010, o projeto de norma ABNT NBR 16384 – Segurança em Eletricidade teve o texto base finalizado em junho de 2015. Elaborado pela Comissão de Estudo de Segurança em Eletricidade (CE-003:064.012) do Comitê Brasileiro de Eletricidade (ABNT/CB-003), o projeto foi submetido à apreciação da sociedade em Consulta Nacional através do edital nº06:2015.

O projeto de norma cita e referencia a IEEE 1584-2002 Guide for Performing Arc-Flash Hazard Calculations e visa “estabelecer regras para operação e realização de serviços em instalações elétricas ou em suas proximidades de forma segura, além de fornecer orientação para elaboração de um programa eficiente de segurança em eletricidade para a execução dos serviços, bem como organizar os aspectos humanos na intervenção destas instalações através de um sistema de gerenciamento” [39].

No dia 15 de agosto de 2015 se encerrou o prazo para manifestação pública à Comissão de Estudo e não há informações se o projeto de norma será aprovado como apresentado, aprovado com modificações ou se será reprovado.



## 5.4 CONCLUSÃO

Ao longo de quase 60 anos, os estudos a respeito do potencial de lesões corporais causadas por arco elétrico vêm ajudando no desenvolvimento de equipamentos e na criação medidas de prevenção e controle de riscos.

Nesse sentido, a evolução de legislação trabalhista específica referente aos trabalhos em eletricidade se mostra determinante para a aplicação de padrões e normas que colaborem com a redução de acidentes e mortes relacionadas ao arco elétrico.

A atualização da NR-10 em 2004 e a elaboração de projeto de norma de Segurança em Eletricidade em 2015 refletem o aprimoramento técnico e a mudança nas discussões de segurança e saúde ocupacional quanto aos serviços em eletricidade. No entanto, persistem no Brasil falta de conhecimento e de entendimento relativo a aplicabilidade e obrigatoriedade das normas nacionais e internacionais.

## CAPÍTULO 6

### FORMAS DE MITIGAÇÃO DOS NÍVEIS DE ENERGIA INCIDENTE

#### 6.1 INTRODUÇÃO

Segundo a OHSAS 18001:2007 [24], padrão internacional que estabelece requisitos relacionados à Gestão da Segurança e Saúde Ocupacional, as medidas de controle para redução do risco devem obedecer preferencialmente a seguinte hierarquia: eliminação, substituição, controles de engenharia, procedimentos de trabalho, medidas administrativas e, por último, a utilização de equipamentos de proteção individual (EPI). A norma regulamentadora nº10 indica as medidas de proteção coletiva como melhor opção em detrimento do EPI [26]. A figura 6.1 ilustra a hierarquia de controle segundo [24]. Assim sendo as vestimentas antichama, descritas no capítulo 4, não podem ser pensadas como primeira e nem única medida para mitigação dos riscos associados à energia incidente. Isto posto, faz-se necessário buscar soluções mais eficientes de redução dos efeitos do arco elétrico.

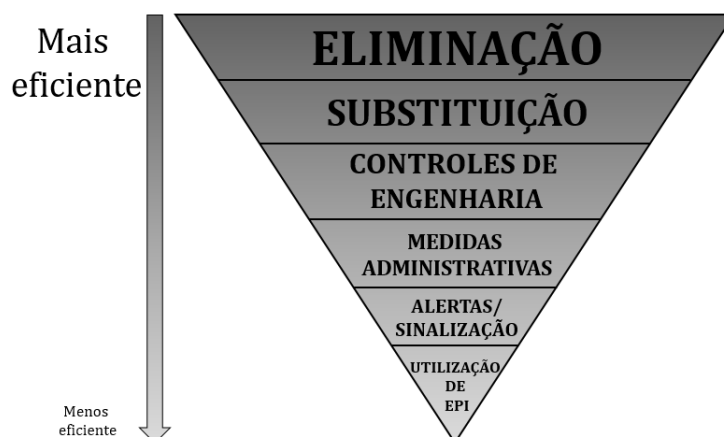


Figura 6.1 – Hierarquia das medidas de controle baseado na OHSAS 18001-2007

Conforme apresentado ao longo do capítulo 3, sabe-se que a energia incidente relaciona-se diretamente com a corrente de curto-circuito do sistema e o tempo de duração do arco elétrico. Dessa forma, explorar maneiras de reduzir essas variáveis (tempo e corrente), surgem como uma alternativa para reduzir a magnitude da energia incidente de uma instalação. A redução da energia para níveis baixos ou muito baixos, conforme [4], trabalha no nível intermediário da hierarquia, reduzindo o risco através de controles de engenharia, desde que atendidos os critérios de confiabilidade das ações.

Outras medidas, dentro da hierarquia de controle, podem também ser tomadas, conjunta ou isoladamente, para limitar os riscos da energia incidente. São elas: utilização de painéis a prova de

arco elétrico, redução do número de pessoas expostas ao risco, isolamento das áreas, sinalização dos locais, procedimentos específicos de trabalho, utilização de EPI, dentre outros.

Apesar do uso do EPI não ser indicado como medida isolada de controle, a sua utilização não deve ser dispensada, especialmente no que se refere aos riscos associados ao arco elétrico. Recomenda-se o uso de vestimenta antichama, ainda que no nível mais básico de proteção, para intervenções em instalações elétricas [4].

## 6.2 REDUÇÃO DOS NÍVEIS DE CURTO-CIRCUITO

Uma das medidas para reduzir os níveis de energia incidente é avaliar a redução das correntes de curto-circuito da instalação. Avaliando as metodologias de cálculo de energia incidente nota-se que a mesma tem relação direta com a corrente de curto. Todavia, ações que levam a redução do curto-circuito, normalmente requerem intervenções mais dispendiosas na instalação, sendo melhor implementadas quando previstas no projeto inicial. Abaixo, exemplos de medidas que atuam diretamente na redução da corrente de curto-circuito.

- Instalação de reatores de limitação: Os reatores inseridos em série com o circuito implicam em uma impedância a mais para o circuito de falta, o que resulta na redução da corrente de curto-circuito. Contudo essa solução traz o inconveniente de aumentar a queda de tensão no ramo em questão. A figura 6.2 ilustra os reatores de limitação instalados no sistema;

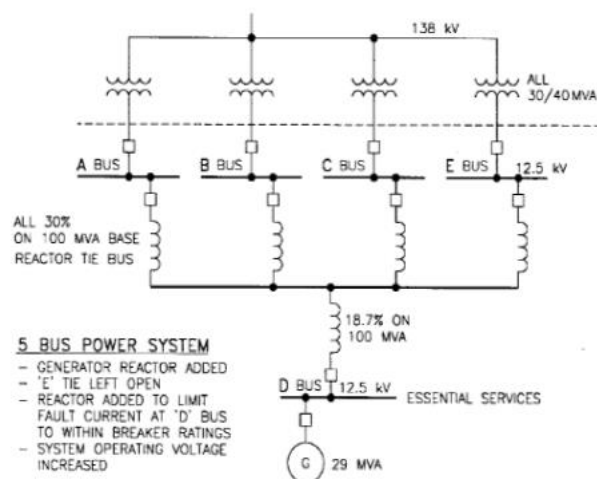


Figura 6.2 – Reatores de limitação – Fonte [40]

- Instalação de transformadores de alta impedância: Analogamente ao princípio de funcionamento dos reatores, o aumento na impedância dos transformadores implica na redução da corrente de curto-circuito. Essa solução contudo acarreta no aumento das perdas do transformador. A figura 6.3 apresenta essa condição.

- Redução da potência dos transformadores (segregação das cargas): Essa solução se mostra eficaz como opção para atenuar os níveis de energia incidente. Uma boa prática durante a fase de projeto é evitar o dimensionamento de transformadores de potência muito elevada, optando pela divisão das carga e utilizando transformadores de menor potência. Essa estratégia reduz os níveis de curto-circuito no lado secundário, fazendo com que os níveis de energia incidente sejam também menores. A figura 6.4 apresenta essa solução. Vê-se como dois transformadores alimentam os blocos de carga separadamente. No lado secundário um disjuntor de barra separa os barramentos A e B. Fica evidente que para um curto-circuito no barramento secundário cada barra (A e B) terá somente uma fonte contribuindo para a falta, o que é positivo do ponto de vista de energia incidente.

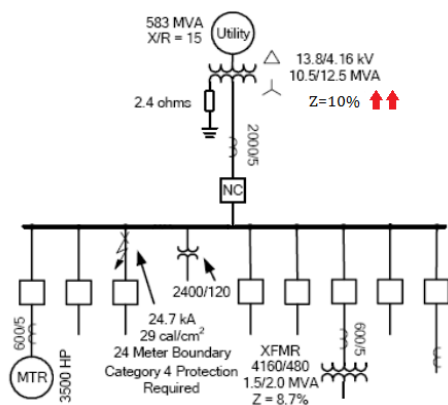


Figura 6.3 – Transformador de alta impedância Adaptado [41]

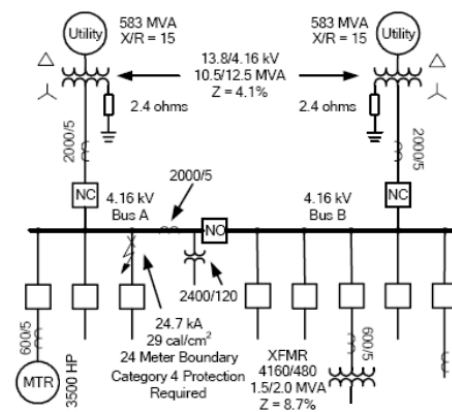


Figura 6.4 – Divisão de cargas em 2 transformadores Fonte [41]

As ações de redução de curto-circuito apresentadas são soluções efetivas para a diminuição dos níveis da energia incidente, porém podem demandar recursos financeiros expressivos e um prazo razoável para sua implementação, uma vez que a planta já esteja em operação.

### 6.3 REDUÇÃO DOS TEMPOS DE ATUAÇÃO DAS PROTEÇÕES

A energia incidente é linearmente proporcional ao tempo de duração do arco elétrico, conforme se verifica em todas as metodologias apresentadas no capítulo 3. Destarte, reduzir o tempo de atuação dos dispositivos de proteção é também uma alternativa para reduzir os níveis de energia incidente. A proteção elétrica de uma instalação é feita, essencialmente, através de relés, disjuntores e fusíveis, que por sua vez possuem tempo de atuação definido de acordo com estudo de seletividade. Não obstante, existem formas, mediante avaliação de engenharia, de controlar os riscos oriundos do arco elétrico através da redução no tempo de atuação dos dispositivos de proteção. Abaixo seguem algumas maneiras de realizar esse procedimento.

## Perda de Seletividade

Para se definir o nível de energia incidente de um dado ponto, verifica-se o tempo de atuação do primeiro dispositivo de proteção à montante desse ponto, pois esse será, a princípio, o tempo que irá durar o arco elétrico. Dessa forma, caso esse intervalo seja demasiadamente longo, gerando um nível elevado de energia incidente, pode-se optar por reduzir esse tempo de atuação, diminuindo, assim, o tempo de duração de um eventual arco elétrico. Essa ação pode implicar na perda da seletividade com os dispositivos de proteções à jusante. Logo, essa modalidade de solução deve ser muito bem avaliada do ponto de vista operacional, verificando os impactos da perda de seletividade para a planta. A figura 6.5 explicita essa condição.

Um curto-circuito com arco elétrico (designado no gráfico pela seta  $F_a$ ) entre o secundário do transformador T1 e o disjuntor designado por Main (em azul) resultaria na atuação do fusível para eliminação da falta. Contudo a extinção do curto pelo fusível se daria em um tempo muito longo, cerca de 1,4s, conforme pode ser visto no gráfico. Esse tempo é demasiadamente demorado para a extinção de um curto-circuito o que levaria aquele ponto a um elevado nível de energia incidente, 63,9 cal/cm<sup>2</sup>. Por conseguinte foi feita a redução do tempo de atuação do relé R1, para a corrente de arco ( $F_a$ ), de forma a promover a eliminação da falta em um tempo diminuto, cerca de 0,5 s. Essa estratégia levou o nível de energia incidente nesse ponto de 63,9 para 29,6 cal/cm<sup>2</sup>. Apesar do benefício gerado por essa ação, essa iniciativa pode gerar atuações descoordenadas do relé, uma vez que entre o fusível e R1 o circuito deriva para alimentar outras cargas.

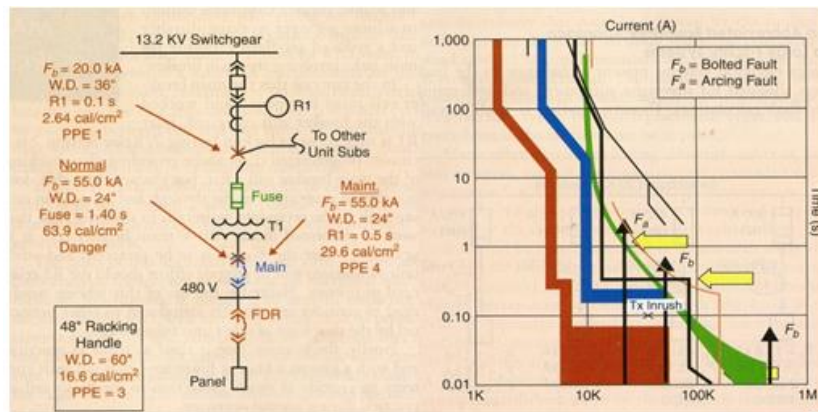


Figura 6.5 – Exemplo de descoordenação para redução de energia incidente – Fonte [40]

## Implementação de seletividade lógica

Para aplicação de seletividade lógica em um esquema de proteção é necessário a utilização de relés digitais, uma vez que é necessário realizar a comunicação entre os dispositivos. Esse recurso permite eliminar a falta em um intervalo de tempo reduzido, normalmente entre 50 e 100 ms

[42]. Não obstante, essa redução no tempo não implica em perda de seletividade. As figuras 6.6 e 6.7 ilustram um esquema típico de seletividade lógica.

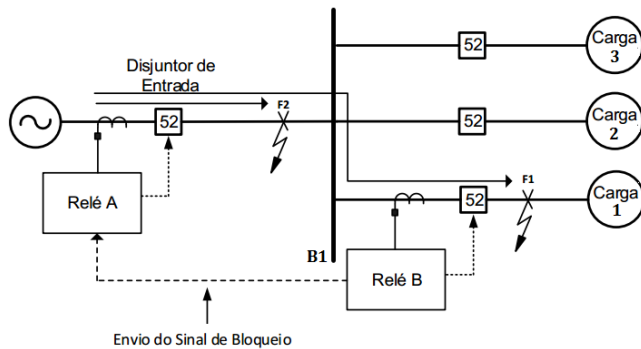


Figura 6.6 – Seletividade Lógica entre relés de sobrecorrente – Fonte [43]

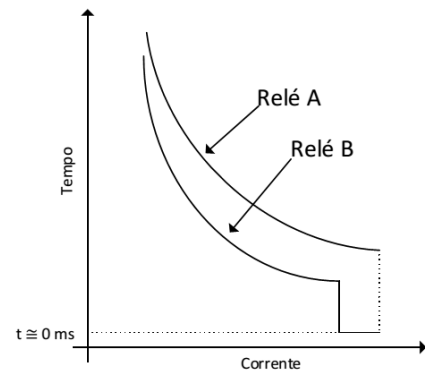


Figura 6.7 – Curvas Relés A e B – Fonte [43]

O relé A faz a proteção geral da barra B1 e o relé B a proteção da carga 1. Para a falta F1, em um esquema de seletividade convencional, os relés A e B entram em pick-up e atuam conforme as curvas da figura 6.7. Contudo, para uma solução utilizando seletividade lógica, a atuação do relé B implica em uma mensagem enviada do relé B para o relé A, informando a atuação do relé B para extinguir a falta. Assim sendo, em tendo recebido a mensagem, o relé A bloqueia o seu trip e, portanto, não atua para essa condição de curto-circuito, a menos que seja atingido o tempo definido pela curva A. Contudo, se a falta for F2, o relé B não é sensibilizado, uma vez que não passa corrente pelo TC do ramal da carga 1. Isto posto, o relé A não receberá o sinal de bloqueio informando da atuação a jusante e dessa forma irá atuar em um tempo menor que aquele definido pela curva. A figura 6.8 mostra um circuito lógico típico a ser implementado no relé para garantir seletividade lógica.

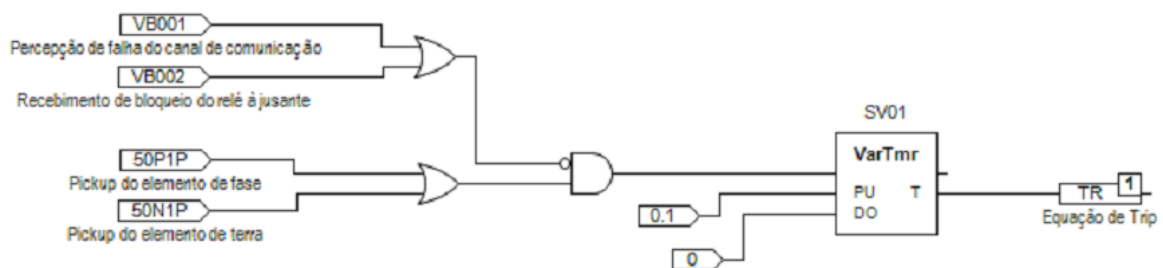


Figura 6.8 – Circuito lógico típico para seletividade lógica – Fonte [43]

Essa solução é especialmente útil onde há um grande escalonamento de relés, o que pode levar os tempos de atuação a valores muito elevados e por conseguinte a altos valores de energia incidente [43]. Ressalta-se que essa solução não impacta em perda da seletividade, ao contrário da solução anterior.

## 6.4 UTILIZAÇÃO DE RELÉ DE PROTEÇÃO CONTRA ARCOS ELÉTRICOS

Conforme apresentado no capítulo 2, a ocorrência do arco elétrico produz grande quantidade de energia na forma de radiação, incluindo as frequências da luz visível [44]. Essa característica permitiu utilizar a própria emissão de luz, proveniente do arco, para eliminar a falta, por meio de sensores de luminosidade [44]. A captação do sinal luminoso em conjunto com um elemento capaz de processar esse sinal e promover o seccionamento do circuito, configura um sistema eficaz de proteção contra arco elétrico. Apesar dos primeiros sensores de luminosidade terem sido desenvolvidos nos anos 80, sua utilização em maior proporção ocorreu somente a partir do ano 2000.

### Princípio de Funcionamento

A emissão de luz, durante a ocorrência do arco elétrico, permite a sua captura por meio de sensor de luminosidade (fibra óptica ou sensor pontual). Esse sinal luminoso trafega pela fibra óptica até o relé de proteção, onde é convertido em sinal elétrico, guardando a devida proporção da intensidade. O relé, então, processa o sinal elétrico e decide, de acordo com o pick-up definido, se a condição é de trip ou não trip. Contudo, a atuação do relé para essa modalidade de proteção é muito rápida, da ordem de poucos milissegundos.

A figura 6.9 mostra o esquema de funcionamento da proteção contra arco elétrico com a utilização de sensores pontuais e regionais (fibra óptica). Ressalta-se que a fibra óptica realiza a função tanto de sensor quanto de meio de transporte para o sinal luminoso. As figuras 6.10 e 6.11 mostram, fisicamente, o sensor pontual e o relé de proteção. Os sensores pontuais possuem uma atuação direcionada, possuindo um ângulo definido para a captação da luminosidade. Esses sensores são normalmente dedicados a um só compartimento. As fibras ópticas (descobertas) por sua vez captam o sinal de luz ao longo de toda a sua extensão, atuando como um sensor compartilhado.

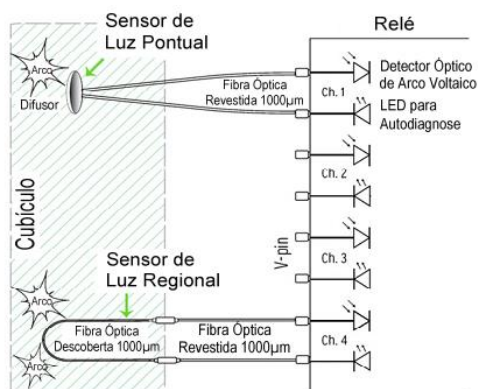


Figura 6.9 – Esquema de funcionamento da proteção  
Fonte [41]



Figura 6.10 – Sensor Pontual  
Fonte [41]



Figura 6.11 – Relé de Proteção  
Fonte [41]

Para garantir maior segurança na atuação da proteção contra arco, o relé de proteção normalmente disponibiliza uma entrada de sobrecorrente, para utilização conjunta com o sinal luminoso. O sinal de sobrecorrente visa confirmar a ocorrência do arco elétrico, de forma a eliminar atuações indevidas do sistema. O pick-up de sobrecorrente é ajustado normalmente em duas vezes a maior corrente de carga do circuito. A taxa de amostragem é de 16 amostras por ciclo para o sinal de corrente e 32 amostras por ciclo para o sinal luminoso. Cada amostra individual é comparada com o valor de pick-up ajustado. Para garantir uma atuação segura, pelo menos duas amostras consecutivas devem estar acima do valor de pick-up [43].

Condições nas quais os sensores de luminosidade estejam expostos a algum tipo de luz, tais como, flashes de máquinas fotográficas, iluminação natural ou artificial, podem levar o relé a operação indevida. Assim o sinal de sobrecorrente irá garantir ao relé a confirmação que realmente a luminosidade é oriunda de um arco elétrico, uma vez que o mesmo é acompanhado de um curto-circuito. Se as duas informações forem disponibilizadas para o relé (luz e corrente) é bastante improvável que o mesmo opere indevidamente. A maioria dos fabricantes recomenda a utilização conjunta da função de sobrecorrente com o sinal luminoso, contudo essa configuração gera um atraso na atuação de aproximadamente 2 ms [44]. A figura 6.12 mostra o circuito lógico do relé para trip em condição de arco elétrico.

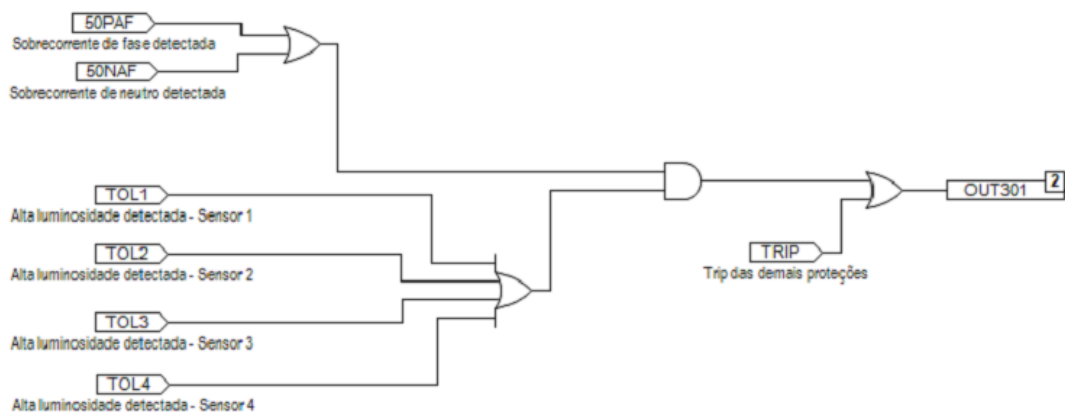


Figura 6.12 – Circuito lógico típico para proteção contra arco elétrico – Fonte [43]

## Arquitetura de Proteção

Para realizar a proteção de arco é necessário definir as zonas de atuação do relé, de forma a acionar o correto dispositivo de proteção para extinguir a falta. Em um painel elétrico, por exemplo, acionar a proteção de entrada não irá eliminar a falta, se essa ocorrer a montante do dispositivo de proteção geral. A figura 6.13 ilustra de forma simplificada o conceito de zonas de proteção.



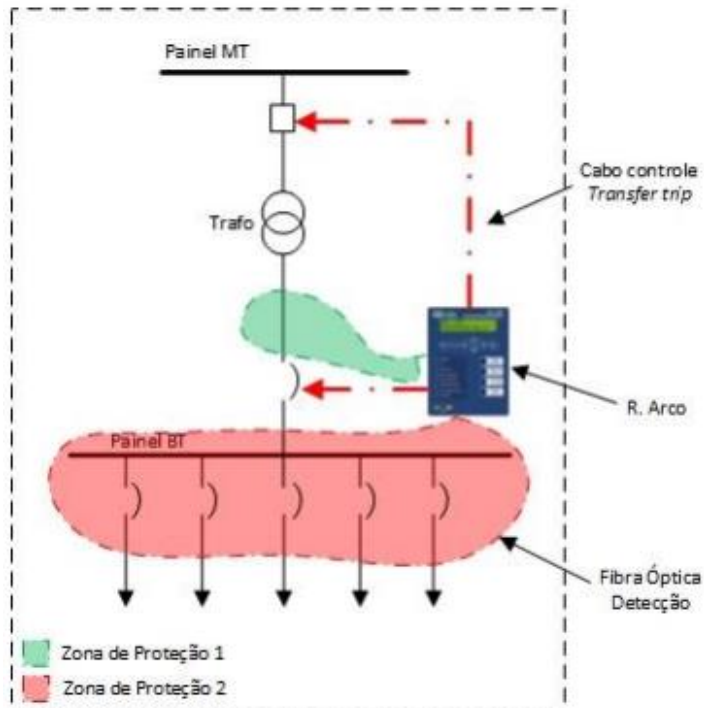


Figura 6.13 – Zonas de proteção do relé – Arranjo típico

Avaliando a figura 6.13, nota-se que para um arco elétrico na região rosa o acionamento do disjuntor de baixa tensão é suficiente para a eliminação do curto-circuito. Entretanto, para um evento na região verde, é necessário atuar na proteção primária do transformador para eliminar a falta. À vista disso, é necessário que o relé possua mais de um conjunto de entradas para os detectores ópticos, de forma a garantir a proteção integral da instalação. A topologia do sistema apresentado na figura 6.13, possibilita habilitar a proteção do relé para as duas variáveis, luz e corrente, para região rosa, o que garante mais segurança na atuação. Entretanto, para a região verde, deve-se fazer a proteção somente com luz, para garantir a condição em que o disjuntor de proteção geral esteja aberto. Nessa condição não haverá passagem de corrente elétrica o que impossibilita a medição de corrente a jusante do disjuntor.

Vale destacar também que, caso a proteção primária do transformador seja feita por fusível, não é viável o arranjo proposto na figura 6.13, sendo necessário acionar o próximo dispositivo a montante ou mesmo desconsiderar a proteção dessa região. Essa condição se verifica em muitos pontos do sistema que será avaliado nesse trabalho.

### Aspectos Construtivos

As características construtivas do painel devem ser verificadas para a correta instalação dos sensores e fibras no interior do equipamento. Os locais para a instalação dos sensores deve ser feita de modo a maximizar a captação da luz durante um evento com arco elétrico e efetuar uma detecção rápida minimizando os riscos. O arco elétrico ocorre, normalmente, nos pontos onde há

transição de condutores (seções de entrada de cabos, conexões com os disjuntores, transições das seções dos barramentos) [45]. Em muitos projetos de painéis essas transições são feitas em compartimentos separados de forma a manter o isolamento para o caso de explosões. A figura 6.14 mostra os melhores locais, segundo [45], para a instalação dos sensores de luz.

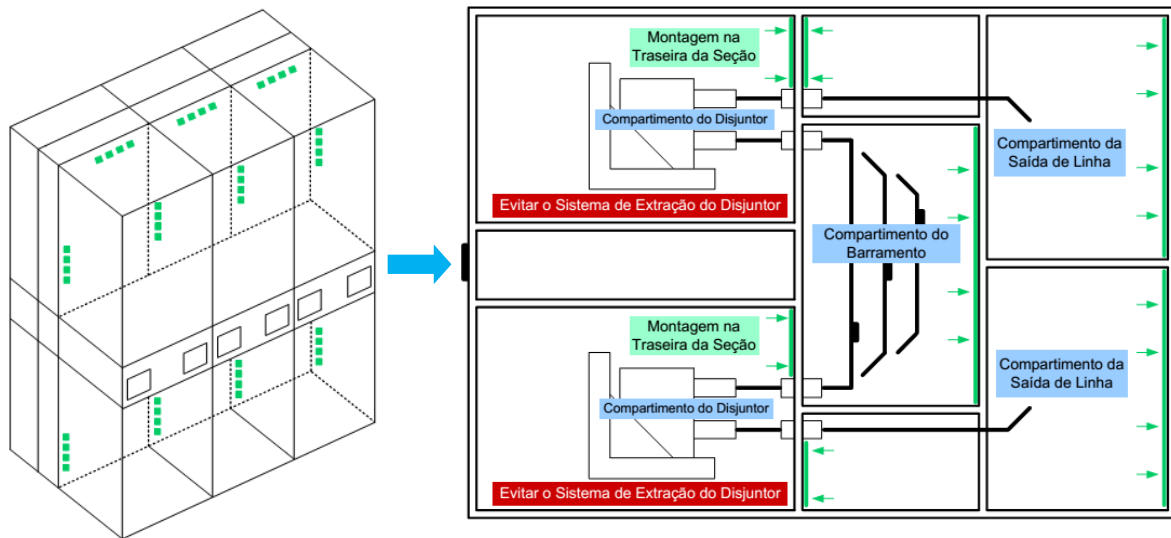


Figura 6.14 – Vista em corte de um painel elétrico – Fonte [45]

Outro ponto a ser observado é a transição da fibra óptica de um compartimento para o outro. Quando necessário realizar novos furos no painel, deve-se ter o cuidado para que não haja comprometimento da isolação e segurança do cubículo e, caso necessário, o fabricante deve ser consultado. Em muitos casos o próprio fabricante já prevê os furos necessários para a instalação dos sensores e fibras, sendo esses o local devido para a instalação [45].

### Registro Oscilográfico

Algumas modalidades de relés apresentam registro oscilográfico da intensidade de iluminação gerada pelo arco elétrico. No exemplo apresentado na figura 6.15 tem-se os gráficos da corrente de falta (em vermelho) e do sinal luminoso (em roxo). A linha vermelha tracejada indica o instante em que o elemento de sobrecorrente foi ativado [45]. Vê-se como atuação ocorre de forma rápida em comparação com a proteção de sobrecorrente convencional. O tempo de abertura do disjuntor é bem mais significativo que o tempo de atuação do relé, para o caso de proteção contra arco. Pode-se notar também, a partir da figura 6.15, que o sinal luminoso não sofre variações significativas ao longo da falta e a frequência, nesse caso, é aproximadamente o dobro da frequência da corrente elétrica. A corrente é dada em Amperes (IB) e o sinal luminoso em Lux (LS).

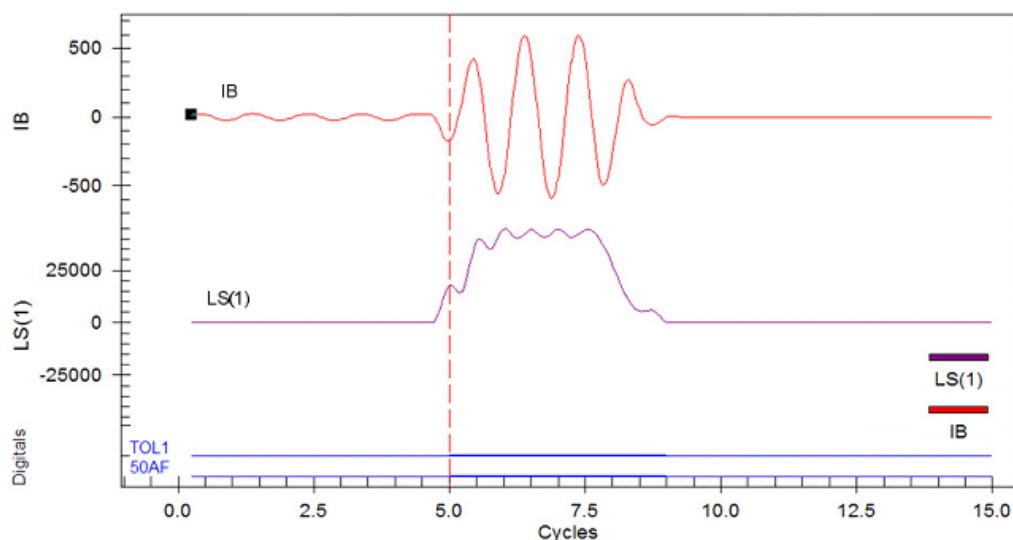


Figura 6.15 – Registro oscilográfico de um relé com detecção de arco voltaico – Fonte [45]

## 6.5 CONCLUSÃO

Os riscos associados à energia incidente devem ser mitigados, de forma a proteger as pessoas e também a instalação dos efeitos relacionados às energias perigosas geradas durante um arco elétrico. Reduzir os níveis de curto-circuito e o tempo de duração do arco elétrico são ações que atuam diretamente na redução dos níveis de energia incidente.

Para a redução do curto-circuito, existem alternativas diversas, a maioria delas passando pelo aumento da impedância de falta. Ações como substituição de transformadores, instalação de reatores em série, levam inevitavelmente a uma redução do curto-circuito, entretanto podem dispendir recursos mais significativos para serem implementadas, quando não planejadas no projeto inicial.

O decréscimo do tempo de atuação das proteções da planta, como forma de reduzir os níveis de energia incidente, se mostra uma solução viável do ponto de vista técnico-econômico. As soluções normalmente não envolvem recursos significativos e apresentam curto prazo para a implementação. Medidas como descoordenação dos dispositivos (relés e disjuntores) podem ser tomadas de imediato, desde que o impacto possa ser absorvido pelo processo produtivo. Recursos como seletividade lógica e o uso do relé de proteção contra arco elétrico, podem também ser conseguidos a um baixo custo e com resultado muito eficaz.

A utilização do relé de proteção contra arco elétrico já se consolida como uma solução corrente no mercado, sendo que muitos fabricantes já fornecem de fábrica equipamentos (especialmente painéis) com o relé de proteção incorporado. Não obstante, essa solução aplicada em uma planta existente não se mostra tão dispendiosa, pois a instalação dos relés e sensores de luminosidade se dá de forma simples, sem grandes impactos nos equipamentos e sem necessidade de grandes interrupções do funcionamento da instalação.

Há ainda outras medidas para controle de risco que não foram exploradas nesse capítulo, tais como: utilização de comando remoto para acionamento de disjuntores (maior risco durante manobras nos painéis), uso de dispositivos pirotécnicos como limitadores de curto-circuito, proteção diferencial de barra, etc.

# CAPÍTULO 7

## ESTUDO DE CASO

### 7.1 INTRODUÇÃO

O estudo de caso tem como objetivo analisar os níveis de energia incidente da instalação elétrica de uma unidade mineradora localizada em Minas Gerais, Brasil. A metodologia IEEE será empregada para realizar os cálculos dos níveis e os resultados encontrados subsidiarão a adoção de medidas de controle para redução dos riscos.

A instalação elétrica em análise apresenta cargas que operam em variados níveis de tensão. A subestação principal recebe energia da concessionária em 13,8 kV e a distribuição para as subestações secundárias é feita através de redes aéreas no mesmo nível de tensão. Essas subestações possuem transformadores de variadas potências e rebaixam os níveis de tensão para 4,16 kV, 480 V, 440 V e 220 V. As principais cargas da instalação são motores (britadores, peneiras, bombas, correias transportadoras, etc.). A figura 7.1 apresenta o diagrama unifilar simplificado da unidade. As subestações essenciais ao processo produtivo são alimentadas em anel de modo a garantir maior confiabilidade ao sistema. O diagrama unifilar completo da instalação é apresentado nos anexos.

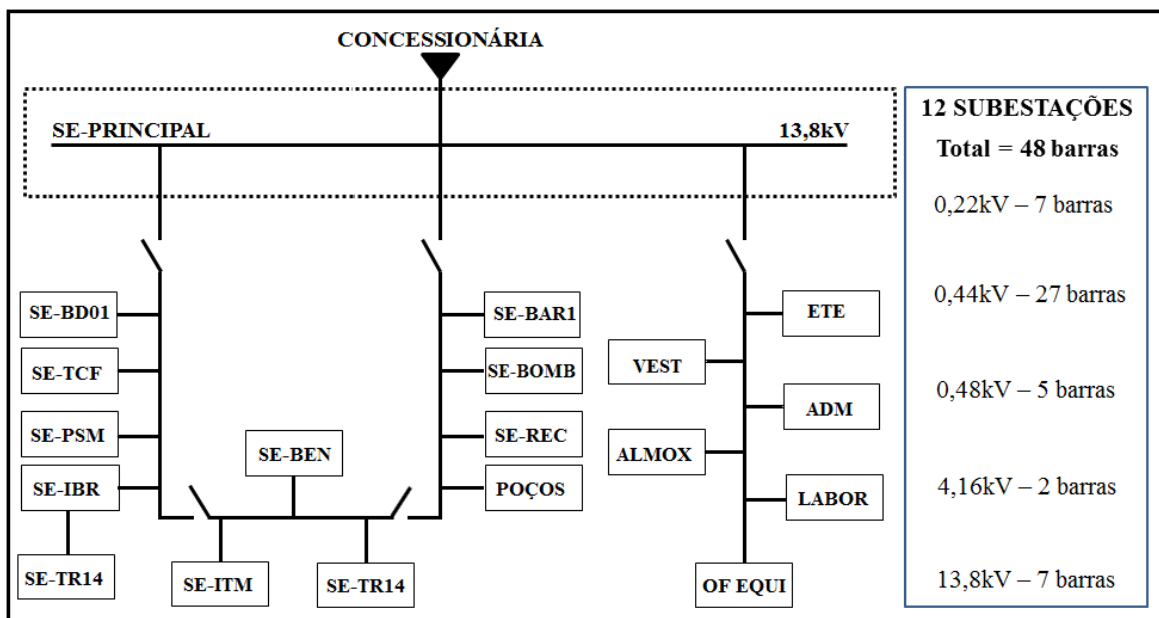


Figura 7.1 – Diagrama unifilar simplificado da instalação

O aterramento da instalação é feito em mais de uma configuração, de acordo com o nível de tensão. Em 13,8 kV o neutro é solidamente aterrado (critério da concessionária). Em contrapartida, no nível de tensão de 480 V, o aterramento é feito através de resistor de alto valor ôhmico, no valor de 3 A. Para os níveis de tensão de 4,16 kV, 440 V e 220 V o neutro é também solidamente aterrado. Para as configurações de neutro solidamente aterrado as correntes de faltas trifásicas são

aproximadamente iguais as faltas monofásicas. Para os casos do neutro aterrado com resistor, o valor desse é que irá determinar a corrente de falta à terra.

## 7.2 ESTUDO DE CURTO-CIRCUITO

Para realizar o cálculo da energia incidente é necessário conhecer os níveis de curto-circuito da instalação elétrica. Conforme apresentado ao longo do capítulo 3 o valor da corrente de curto será um fator determinante no valor final da energia incidente, uma vez que as duas grandezas são proporcionais. Para encontrar as correntes de curto-circuito nas barras da instalação foi realizada simulação através de software adequado. A definição dos ajustes dos dispositivos de proteção também foi realizada com o auxílio do programa.

O software utilizado para simulação foi o SKM Power Tools for Windows (PTW), versão 7.0.1.6. Esse software realiza simulações de curto-circuito, seletividade, qualidade de energia, partidas de motores, energia incidente, dentre outros. Para esse trabalho utilizou-se somente os módulos de curto-circuito (DAPER) e seletividade (CAPTOR). O software disponibiliza mais de uma metodologia de cálculo para determinar as correntes de curto-circuito. Para esse estudo de caso foi considerada a IEC-60909 como referência [9]. Os cálculos dos níveis de energia incidente foram feitos utilizando-se diretamente a metodologia IEEE apresentada no capítulo 3, por meio de um programa desenvolvido em Matlab.

As correntes de curto-circuito na barra de entrada da subestação principal, conforme dados da concessionária, são:

- $I_{3\phi} = 1263 \angle -60,14^\circ A$
- $I_{\phi T} = 849 \angle -56,42^\circ A$

### Motores de Indução

Para a contribuição dos motores na correntes de curto-circuito máximo, utilizou-se a também a referência [9]. Os motores de baixa tensão foram modelados como um motor equivalente, com reatância subtransitória padronizada em 17%. Foram considerados para o cálculo do curto-circuito somente os motores equivalentes cuja corrente ultrapassou 1% da corrente de curto-circuito trifásico simétrica. Os valores de fator de potência e rendimento foram obtidos diretamente dos dados de placa dos motores. Os valores de X/R para os motores de baixa tensão foram extraídos de [9], sendo X/R=0,42. Os motores de média tensão foram modelados individualmente. Cabe aqui ressaltar que os motores alimentados por inversores de frequência não foram considerados para o

cálculo, uma vez que os mesmos não contribuem para a corrente de curto. O cálculo para as correntes de contribuição, para motores de baixa e média tensão, se dão conforme a tabela 7.1.

Tabela 7.1 – Cálculo da contribuição dos motores para a corrente de curto-circuito

Corrente de curto-circuito simétrica inicial ( $I''k$ )	Corrente de curto-circuito simétrica transitória ( $Ib$ )	Corrente de curto-circuito simétrica permanente ( $Ik$ )
$I''k = \frac{c \times V_n}{\sqrt{3} \times Z_M}$	$Ib = \mu \times q \times I''k$	$Ik = 0$

Onde:

- $c$  – Fator de Tensão: em BT 1,05 para curto máximo e 0,95 para curto mínimo;
- $V_n$  – Tensão nominal;
- $Z_M$  – Impedância do motor definida pela expressão:

$$Z_M = \frac{1}{I_p/I_n} \times \frac{V_{n_M}^2}{MVA_M} \quad (7.1)$$

A corrente  $I_p$  é a corrente de partida do motor e  $I_n$  a nominal.  $V_{n_M}$  e  $MVA_M$  são a tensão nominal e a potência do motor respectivamente.

- $\mu$  - O decaimento da corrente de curto-circuito transitória está relacionado ao fator " $\mu$ ", que por sua vez depende do tempo de abertura do disjuntor e da razão entre a corrente subtransitória e a corrente nominal do motor. Quando não for possível determinar o valor de " $\mu$ ", toma-se o valor 1;
- $q$  - O fator " $q$ " também é função do tempo de abertura do disjuntor e depende também da potência ativa do motor e do número de polos.

Os valores de  $\mu$  e  $q$  são inseridos automaticamente pelo software SKM a partir do momento que se determina o método para o cálculo de curto-circuito desejado.

A contribuição dos motores para a corrente de falta se dá por um período limitado. Esse período depende da potência do motor, da impedância do sistema até o ponto de falta, do número de polos, etc. Esse período varia de 0,5 ciclo para motores até 37 kW (50 HP) chegando até 4 ciclos para motores com potência superior a 186 kW (250 HP) [46].

## Outras Cargas

Conforme [9] [42], cargas não motóricas não foram consideradas para o cálculo de curto-circuito, bem como bancos de capacitores e filtros de harmônicos, pois o tempo de contribuição desses é muito pequeno e em uma frequência muito acima da frequência industrial.

## Perfil da Corrente de Curto Circuito

A figura 7.2 mostra uma curva de curto-circuito típica, segundo [9]. Pode-se notar a evolução do curto-circuito no tempo. A curva é dividida basicamente em três períodos, subtransitório, transitório e permanente.

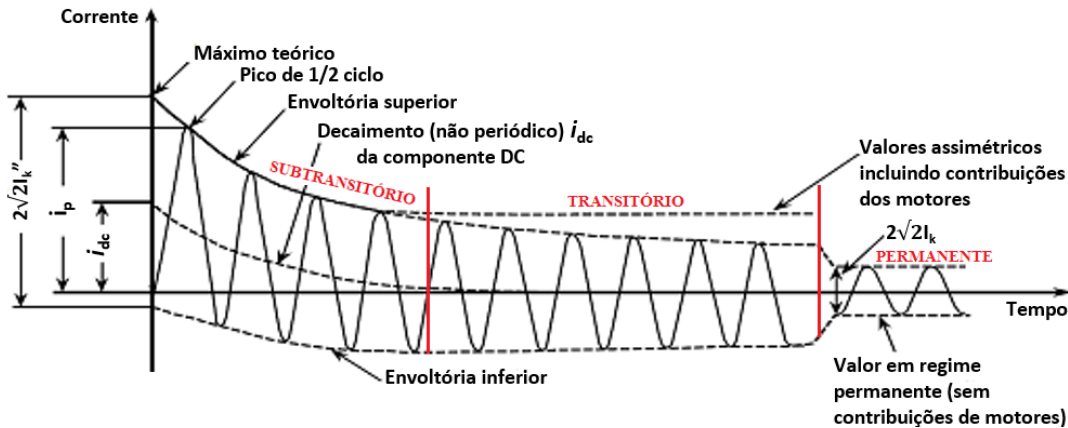


Figura 7.2 – Perfil da corrente de curto-circuito segundo IEC-60909 – Adaptado de [9]

## Período subtransitório

Nesse intervalo está presente a participação dos motores no curto-circuito. Durante esse período, a corrente de contribuição dos motores é majorada devido a redução da reatância das máquinas, reatância subsíncrona, decorrente da saturação do circuito magnético. A duração do período subtransitório irá depender dos tipos de fontes conectadas ao sistema durante o curto-circuito [42]. Para o caso onde somente a concessionária e os motores de indução contribuam, esse tempo irá variar de 0,5 a 4 ciclos, podendo ser maior caso existam motores síncronos contribuindo durante a falta [46].

Outra contribuição que está presente nesse período está relacionada à energia armazenada nas indutâncias do sistema no momento que ocorre o curto-circuito. A componente DC que aparece na corrente de falta (assimetria) está associada a essa energia, devolvida à rede quando ocorre um curto-circuito. Essa assimetria dependerá de dois fatores, o valor da tensão no instante em que ocorre a falta e o valor de X/R do sistema. O cálculo do fator de assimetria [47] é dado pela equação 7.2.

$$\text{Fator\_de\_Assimetria} = \sqrt{1 + 2 \cdot e^{-\frac{4\pi}{(X/R)} t_c}} \quad (7.2)$$

Dois valores de corrente são definidos nesse período da falta ( $I_p$  e  $I''_k$ ), e são importantes para a avaliação dos efeitos do curto-circuito na instalação.



### $I_p$ – Máximo valor instantâneo possível da corrente de curto-circuito

Conhecido o valor de  $I_p$ , se define:

- Capacidade de estabelecimento de disjuntores de média e alta tensão;
- Capacidade de estabelecimento de disjuntores de baixa tensão do tipo caixa aberta.
- Correntes dinâmicas de barramentos de painéis e CCM.

### $I''_k$ – Corrente de Curto-Circuito Simétrica Eficaz Inicial

Valor eficaz da componente simétrica CA da corrente de curto-circuito potencial (disponível) aplicável no instante do curto-circuito (1/2 de ciclo), se a impedância do sistema permanecer inalterada.

Conhecido o valor de  $I''_k$ , se define:

- Capacidade de interrupção de disjuntores de baixa tensão e fusíveis;
- Ajuste das funções de sobrecorrente instantânea (ANSI 50) dos dispositivos de proteção;
- Cálculo da energia incidente para o curto-circuito máximo.

### **Período transitório**

Nesse período parte da energia, ou toda ela, armazenada nos motores e indutâncias do sistema, já foi devolvida ao sistema. Essa consideração irá depender novamente dos tipos de fonte que contribuem para o curto bem como da relação X/R do sistema. A corrente nesse período é menor que no período anterior e maior que no período subsequente. Nesse intervalo define-se a corrente  $I_b$ , conforme descrição abaixo

### $I_b$ – Corrente de Curto-Circuito de Interrupção

Valor eficaz de um ciclo integral da componente CA ou CC da corrente de curto-circuito disponível, no instante da separação dos contatos do primeiro pólo do dispositivo de interrupção. Neste estudo adotou-se o tempo típico de 5 ciclos (83,33ms) para o cálculo desta corrente.

Conhecido o valor de  $I_b$ , se define:

- Capacidade de interrupção de disjuntores de alta e média tensão;
- Ajuste das funções de sobrecorrente temporizadas (ANSI 51) dos relés de proteção.

## **Período permanente**

Nesta fase, permanece somente a contribuição da concessionária para o curto-circuito. A assimetria também já se encerrou por completo (fim do período transitório). Nota-se que se o curto-circuito não possuir contribuições de cargas motóricas e a relação X/R do sistema foi muito baixa, o valor da corrente será praticamente o mesmo durante toda a duração da falta. A duração do período permanente se inicia no fim do período transitório e se estende até a interrupção da corrente. No período permanente define-se a corrente  $I_k$ .

### $I_k$ – Corrente de Curto-Circuito em Regime Permanente

Valor eficaz da corrente quando somente a fonte contribui para o curto-circuito e o fenômeno transitório já se encerrou por completo.

Conhecido o valor de  $I_k$ , se define:

- Ajuste das funções de sobrecorrente temporizadas de relés de proteção;
- Corrente térmica de disjuntores de alta, média e baixa tensão;
- Cálculo da energia incidente para o curto-circuito mínimo.

## **Análise dos Disjuntores**

A avaliação dos disjuntores será feita a partir das corrente de curto-circuito obtidas por simulação e pelas recomendações das referências [42] e [47].

### Capacidade de Interrupção Nominal do Disjuntor ( $I_{sc}$ )

A corrente que o disjuntor é capaz de interromper quando da ocorrência do curto-circuito (corrente nominal do disjuntor), para um tempo equivalente ao de abertura do disjuntor, deve ser maior que a corrente  $I_b$  assimétrica, definida anteriormente. Quando não for conhecido o tempo de abertura do disjuntor é recomendado o uso de  $I_b$  assimétrico para 5 ciclos. Em outras palavras, o disjuntor deve ser capaz de interromper tanto a componente alternada, quanto a componente contínua do curto-circuito. Fica evidentemente a dependência da contribuição das cargas motóricas para o dimensionamento do disjuntor.

### Capacidade de estabelecimento do disjuntor

O disjuntor, seja em baixa ou média tensão, deve suportar uma corrente de curto-circuito de estabelecimento. Essa corrente é definida por norma e corresponde a 2,6 vezes a capacidade de interrupção nominal do disjuntor para a média tensão, considerando uma constante de tempo igual

a 45ms. Em baixa tensão esse valor é igual a 2,2 vezes a corrente nominal. A corrente de estabelecimento deve ser maior que a máxima corrente de pico ( $I_p$ ), definida anteriormente.

### **Análise dos Barramentos**

Para a avaliação dos barramentos, deve-se observar os valores das correntes térmica e dinâmica do painel. A corrente térmica está relacionada com a suportabilidade (temperatura) dos barramentos e deve ser maior que a corrente de curto-circuito transitória ( $I_b$ ) naquele ponto. O barramento deve suportar essa corrente por até 1 s sem sofrer danos. A corrente dinâmica está relacionada com o esforço mecânico que os barramentos experimentam durante o curto-circuito. Essa corrente deve ser maior que o valor máximo da corrente de pico ( $I_p$ ) da instalação naquele ponto.

Em resumo:

- $I_{dinâmica} > I_p$
- $I_{térmica} > I_b$

Os valores de curto-circuito determinados pelo módulo DAPPER do software SKM serão utilizados para determinar os ajustes dos dispositivos de proteção e também realizar os cálculos do níveis de energia incidente oriunda de arcos elétricos. Após realizada a simulação, os valores de  $I_p$ ,  $I''_k$ ,  $I_b$  e  $I_k$  serão conhecidos para cada barra (ou painel). De posse desses valores é possível verificar também os critérios de suportabilidade dos equipamentos da planta, como barramentos, disjuntores, cabos, transformadores, entre outros. O levantamento das correntes de curto-circuito permite também avaliar os impactos do acréscimo e substituição de equipamentos na planta, que podem ter o efeito de majorar ou reduzir as corrente de curto. Para esse trabalho serão especialmente úteis as correntes  $I''_k$  e  $I_k$ , para o cálculo da energia incidente pelo curto máximo e pelo curto mínimo.

### **7.3 AVALIAÇÃO DOS AJUSTES DAS PROTEÇÕES**

Cabe fazer algumas considerações acerca da filosofia de proteção definida para os ajustes dos dispositivos da instalação. Nesse capítulo serão feita algumas considerações sobre as formas de proteção dos equipamentos elétricos da planta, os principais elementos de um sistema de proteção, relés, disjuntores e os elementos sensores, transformadores de corrente e potencial.

Os ajustes dos dispositivos (relés, disjuntores e fusíveis) são melhor avaliados na forma gráfica, em diagramas conhecidos como coordenogramas. Nesses gráficos são plotados os ajustes

de proteção e as curvas de suportabilidade dos equipamentos protegidos. Assim sendo é possível avaliar a qualidade da proteção bem como verificar a coordenação dos dispositivos de forma a garantir a seletividade. Os coordenogramas serão particularmente úteis para avaliar a variação nos níveis de energia incidente.

### **Relés de Proteção**

Segundo [48], “o relé de proteção é um elemento cuja função é detectar nas linhas ou aparelhos faltosos, perigosas ou indesejáveis condições do sistema elétrico, e iniciar convenientes manobras de chaveamento ou dar o aviso adequado”. Os tipos de relés mais comuns são: eletromecânicos, estáticos ou eletrônicos, numéricos ou microprocessados. Atualmente, devido a vasta gama de funções disponíveis nos relés numéricos, os mesmos tem recebido o nome de IEDs - *Intelligent Electronic Devices*. Os principais pontos positivos oferecidos pelos IEDs são: faixas de ajustes mais precisas e confiáveis, registro de eventos e oscilografia, intertravamentos lógicos, medição de grandezas elétricas, comunicação via rede, dentre outros. Os relés de proteção estão especialmente presentes nos circuitos de média tensão, onde a atuação dos disjuntores depende de um comando prévio dos relés. Os relés que estão presentes na planta analisada nesse trabalho são, em sua maioria, relés microprocessados.

### **Disjuntores**

Os disjuntores são dispositivos que seccionam o circuito elétrico em caso de defeitos no sistema [48]. Para a média tensão (1 a 36 kV) bem como na alta tensão (acima de 36 kV), os disjuntores precisam de um elemento sensor para detectar o defeito, TC ou TP, e de um elemento para comandar a sua atuação, no caso, os relés de proteção. Para os disjuntores de baixa tensão (até 1 kV) já é parte integral do dispositivo o elemento sensor e o comando para sua atuação, não sendo imperativo o TC e o relé de proteção. Os disjuntores em baixa tensão possuem normalmente atuação térmica e magnética, sendo a primeira para atuações devido a sobrecargas e a segunda a curtos-circuitos. Quanto aos aspectos construtivos, os disjuntores podem ser caixa moldada (MCB) ou caixa aberta e o isolamento normalmente é feito à ar, óleo ou SF<sub>6</sub>. Na unidade industrial que trata esse trabalho, estão presentes todos os tipos de disjuntores citados acima, com exceção daqueles com isolamento à óleo.

### **Transformadores de Corrente**

Em [49] é dada a definição de um transformador de corrente. Trata-se do transformador que tem o seu lado primário conectado em série com o circuito no qual se deseja medir ou controlar a

corrente elétrica. Os TC, como são também conhecidos esses transformadores, reproduzem em menor escala os valores de corrente que circulam nos circuitos com correntes de maior magnitude, respeitando a defasagem fasorial e com relação de transformação e erro definidos por norma. Os TC variam em seu aspecto construtivo, podendo ser do tipo enrolado, bucha, barra e janela, cada um com aplicações específicas. Para se especificar um TC é necessário determinar sua aplicação, se o mesmo é para medição ou proteção, o que influi no valor da sua corrente de saturação, normalmente  $2.I_n$  para medição e  $20.I_n$  para proteção. O erro do TC também influi no seu desempenho, variando de 0,1 a 1% para medição e de 5 a 10% para proteção. Abaixo as características dos principais tipos de TC.

- Tipo enrolado: Usado quando são requeridas relações de transformações inferiores a 200-5. Possui isolamento limitada e, portanto, se aplica em circuitos até 15 kV;
- Tipo barra: Neste tipo, o enrolamento primário é constituído por uma barra, montada permanentemente através do núcleo do transformador;
- Tipo bucha: Consiste de um núcleo toroidal, somente com enrolamentos secundários. O núcleo fica situado ao redor de uma bucha de isolamento, através da qual passa um condutor, que substituirá o enrolamento primário. Este tipo de TC é comumente encontrado no interior das buchas de disjuntores, transformadores, e religadores;
- Tipo janela: Possui construção similar ao tipo bucha, sendo que o meio isolante entre o primário e o secundário é o ar. O enrolamento primário é o próprio condutor do circuito, que passa por dentro da janela.

Em [50] encontramos os principais dados para a especificação de um TC.

- Corrente nominal primária ( $I_1$ ); Relação nominal (RTC);
- Tensão Máxima e nível de isolamento;
- Frequência de operação;
- Carga Nominal;
- Exatidão;
- Número de núcleos par medição e proteção;
- Fator térmico nominal ( $F_{tn}$ );
- Corrente suportável nominal de curta duração (corrente de curto-circuito térmica -  $I_{ccth}$ ) para 1s;
- Valor de crista da corrente suportável (corrente de curto-circuito dinâmica –  $I_{ccdyn}$ );
- Classe de isolamento;
- Nível básico de isolamento – NBI;
- Tipo de aterramento do sistema;
- Uso: para interior (indoor) ou para exterior (outdoor).

A correta especificação do TC é fundamental para o funcionamento da proteção. Caso essa especificação não seja feita corretamente o TC pode levar o relé a operações indevidas ou mesmo a não operação. Um exemplo seria o uso do TC de medição realizando a função de proteção. Como a saturação do TC de medição ocorre para valores bem mais baixos de corrente primária, durante um curto-circuito a corrente secundária do TC ficaria ceifada, não reproduzindo fielmente a corrente primária. A figura 7.3 ilustra o comportamento de um TC saturado, nota-se como o valor RMS da corrente secundária fica reduzido.

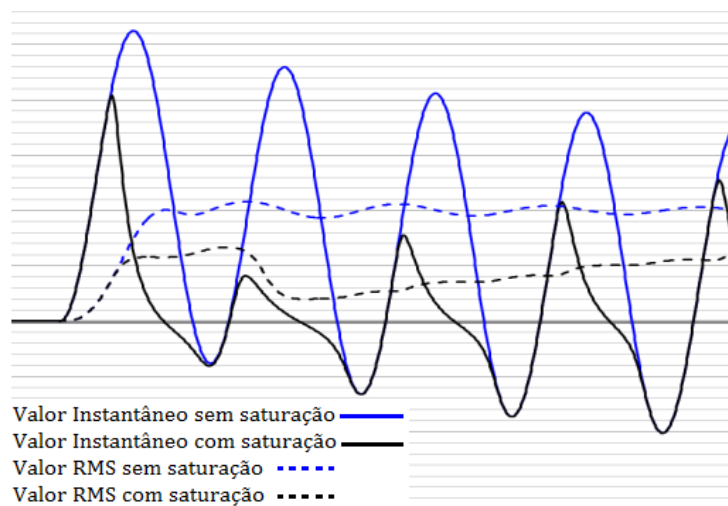


Figura 7.3 – Saturação de um TC – Adaptado de [51]

## Transformadores de Potencial

Analogamente ao transformador de corrente, o transformador de potencial, ou TP, é um transformador que tem o seu lado primário conectado em paralelo com o circuito no qual se deseja medir ou controlar a tensão. O TP reproduz em menor escala os valores de tensão existentes em circuitos com maiores valores de tensão, respeitando a defasagem fasorial e com relação de transformação e erro definidos por norma. Os TP não apresenta problema de saturação na ocorrência de curtos-circuitos, como ocorre com o TC. Contudo é importante definir se a aplicação será para medição ou proteção, uma vez que o erro para medição deve ser menor, 0,3%. As classes de exatidão padronizadas por [49] e [52] são 0,3%, 0,6% e 1,2%. Destaca-se que o TP não tem um papel relevante para a proteção de sobrecorrente convencional. De forma similar ao TC, os dados necessários para especificar um TP são [52]:

- Tensão nominal primária ( $V_{1n}$ ) e secundária ( $V_{2n}$ );
- Relação nominal do TP (RTP);
- Tensão máxima e classe de isolamento;
- Frequência;

- Carga nominal;
- Classe de exatidão;
- Potência térmica nominal;
- Grupo de ligação ou fator de sobretensão nominal;
- Nível Básico de Isolamento – NBI;
- Tipo de aterramento do sistema;
- Para TP indutivo de dois ou mais secundários, a carga máxima simultânea;
- Uso: para interior (indoor) ou para exterior (outdoor).

### **Coordenogramas**

Os coordenogramas são gráficos de corrente por tempo ( $I \times t$ ), representados em escala log-log, onde se esboçam as curvas de suportabilidade dos elementos protegidos e as curvas dos dispositivos que farão a proteção desses equipamentos. Devem ser indicados também nos coordenogramas as restrições relativas ao período transitório dos equipamentos, tais como partida de motores, energização de transformadores e filtros de harmônicos, dentre outros. Abaixo seguem algumas informações que normalmente são indicadas nos coordenogramas.

- Corrente nominal dos transformadores de força, motores e alimentadores;
- Curvas de suportabilidade térmica dos transformadores de força e motores;
- Curvas de suportabilidade de curto-circuito de cabos de força;
- Ponto de Inrush dos transformadores;
- Curva de partida dos motores;
- Ponto de rotor bloqueado dos motores;
- Curvas de energização de filtros de harmônicos;

Na figura 7.4 pode-se ver um coordenograma típico onde constam: curva de partida do motor, curva de suportabilidade do transformador (T2) e ponto de inrush (TX), curva dos cabos primários (CP) e secundários (CS) e as curvas de atuação dos dispositivos de proteção, fusível (FU) e disjuntor (DJ). A curva relativa ao motor ( $M_{equiv}$ ) na realidade representa um conjunto de motores, sendo o maior deles partindo e os demais operando em condições nominais. As correntes indicadas em vermelho e azul no eixo horizontal representam os valores máximos de curto-circuito ( $I''k$  simétrico) nas barras BP e B3, respectivamente. As curvas dos dispositivos que protegem cada motor individualmente não estão representadas nesse coordenograma.

Analisando a figura 7.4 vê-se que os cabos, tanto no lado primário quanto secundário, estão devidamente protegidos pelo fusível. O transformador, já representado pela curva de

suportabilidade térmica deslocada (fator 0,58 - ANSI) e pelo limite mecânico, está protegido pelo fusível (FU) para as correntes de curto-circuito no primário e pelo disjuntor (DJ) para as correntes de curto-circuito no secundário. Cabe ressaltar que o ponto de Inrush está quase 1 segundo abaixo da curva do fusível, não impedindo a energização do transformador.

O disjuntor (DJ) faz a proteção geral do barramento B3 e também protege o transformador para curto-circuito no secundário e eventuais sobrecargas. Vê-se que a operação e a partida dos motores está também garantida pelo disjuntor. Nota-se que para o caso de correntes de curto-circuito, no secundário, menores que 16kA, aproximadamente, tem-se somente a atuação do disjuntor como proteção para o transformador, não havendo a atuação do fusível como proteção de retaguarda. Não obstante esse coordenograma representa uma configuração típica de proteção.

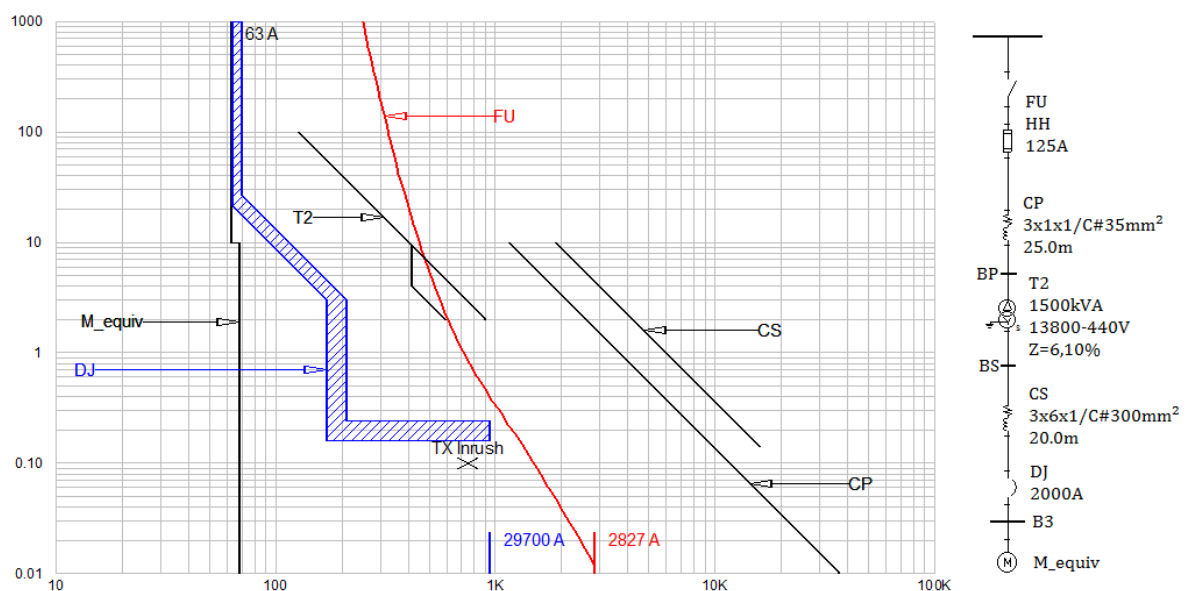


Figura 7.4 – Coordenograma típico

O coordenograma apresentado acima permite extrair informações importantes e necessárias para avaliação dos níveis de energia incidente na barra B3. Dado que é necessário conhecer o tempo de duração do arco elétrico para as correntes de curto-circuito máximo e mínimo, a curva do dispositivo DJ permite extrair essa informação facilmente, contanto que as correntes já sejam conhecidas. Dessa forma, soma-se esse tempo de atuação ao tempo de abertura do disjuntor, obtendo a duração total da falta. Pode-se concluir, portanto, que os níveis de energia incidente de uma instalação elétrica estão intrinsecamente vinculados aos tempos de atuação dos dispositivos de proteção.



## 7.4 CÁLCULO DOS NÍVEIS DE ENERGIA INCIDENTE

Para determinar os níveis de energia incidente da instalação pela metodologia IEEE são necessários os dados apresentados no capítulo 3. Logo, uma vez determinadas as correntes de curto-circuito das barras da instalação ( $I''_k$  e  $I_k$ ), os tempos de atuação das proteções (extraídos dos coordenogramas) e as configurações necessárias (distâncias de trabalho, espaçamento entre os condutores, configurações abertas ou fechadas, tipo de aterramento) pode-se realizar o cálculo da energia incidente para cada barra e então definir medidas de controle para os pontos que apresentarem grau de energia incidente crítico.

Para a instalação em análise nesse trabalho, foram consideradas críticas as instalações com energia incidente maior ou igual  $8 \text{ cal/cm}^2$ , categoria 2, segundo [4]. Conforme descrito anteriormente é imperativo proteger o trabalhador com vestimenta adequada, com nível de proteção (ATPV) no mínimo igual à energia incidente da instalação. Dessa forma o valor de  $8 \text{ cal/cm}^2$  é razoável do ponto de vista prático, uma vez que as vestimentas antichama para esse nível de proteção, apresentam certo grau de conforto e mobilidade e podem ser utilizadas por longas horas pelo indivíduo durante a jornada de trabalho. Ademais cabe frisar que vestimentas mais pesadas podem prejudicar demasiadamente a mobilidade do trabalhador se tornando mesmo uma causa de acidentes [34]. A tabela 7.2 apresenta os valores de energia incidente para as barras com nível de energia incidente crítico.

Tabela 7.2 – Resultado para as barras com nível de energia incidente  $\geq 8 \text{ cal/cm}^2$

SE	Barra	Tensão kV	Tipo $I_{cc}$	$I_{bf}$ kA	$I_{bf_a}$ kA	$I_a$ kA	$I_{a_d}$ kA	TRIP s	$t_a$ s	Tipo At	GAP mm	D mm	E $\text{cal/cm}^2$	Cat. Risco	Db mm
SE-B	B1	0,48	Máx ( $I''_k$ )	31,0	25,5	17,2	14,1	0,200	0,050	RAVO	25	455	<b>19,50</b>	3	2488
			Mín ( $I_k$ )	18,6	18,6	11,1	11,1	0,200					<b>10,23</b>	3	1680
SE-I	B2	0,48	Máx ( $I''_k$ )	36,0	28,6	19,6	16,1	0,220	0,050	RAVO	25	455	<b>24,24</b>	3	2841
			Mín ( $I_k$ )	18,3	18,3	11,0	11,0	0,220					<b>10,89</b>	3	1744
SE-IT	B3	0,44	Máx ( $I''_k$ )	29,7	23,4	15,2	12,5	0,250	0,050	Solidamente Aterrado	25	455	<b>15,86</b>	3	2194
			Mín ( $I_k$ )	17,8	17,8	9,98	9,98	0,250					<b>8,39</b>	3	1489
SE-AR	B4	0,44	Máx ( $I''_k$ )	27,8	20,3	14,4	11,1	0,220	0,050	Solidamente Aterrado	25	455	<b>13,45</b>	3	1984
			Mín ( $I_k$ )	16,1	16,1	9,17	9,17	0,220					<b>6,90</b>	2	1322
SE-BF	B5	0,44	Máx ( $I''_k$ )	21,8	20,6	11,8	11,3	0,250	0,050	Solidamente Aterrado	25	455	<b>12,00</b>	3	1851
			Mín ( $I_k$ )	15,9	15,9	9,09	9,09	0,250					<b>7,59</b>	2	1400

A primeira coluna da tabela 7.2 identifica a subestação e a segunda coluna enumera as barras. Na realidade cada barra corresponde a um painel elétrico. A terceira coluna indica o nível

de tensão de cada painel. A coluna Tipo  $I_{CC}$  mostra para qual corrente de curto-circuito foi feito o cálculo da energia incidente. A indicação máx. refere-se à máxima corrente de falta simétrica ( $I''_k$ ) e a indicação mín. refere-se a corrente mínima de falta ( $I_k$ ). Cabe lembrar que a metodologia IEEE recomenda o cálculo da energia incidente para a corrente máxima e mínima, com a particularidade de multiplicar a corrente mínima por um fator de 0,85. A coluna  $I_{bf}$  indica o valor da corrente de curto-circuito franco na barra ao passo que a coluna  $I_{bf_d}$  indica a corrente que efetivamente passa pelo dispositivo de proteção. Uma vez que se tem contribuição dos motores para o curto-circuito na barra é esperado que esses valores sejam diferentes. As colunas  $I_a$  e  $I_{a_d}$  apresentam os valores das correntes elétricas para o curto-circuito limitado por arco elétrico, de acordo com a metodologia IEEE. É importante enfatizar que o tempo de atuação do dispositivo de proteção está relacionado com a corrente que efetivamente passa pelo elemento sensor, ao passo que a energia incidente é proporcional a corrente que chega na barra (fonte + motores).

A coluna TRIP mostra o tempo de atuação dos dispositivos de proteção para a corrente  $I_{a_d}$ , para o curto-circuito máximo e mínimo. Os tempos de atuação considerados levaram em conta a incerteza das curvas de cada dispositivo, sendo considerado o limite superior das mesmas. A coluna  $t_d$  indica o tempo de abertura dos disjuntores, no caso 50ms para todos. Esse tempo será somado ao tempo de TRIP e o resultado será considerado para o cálculo da energia incidente. As colunas seguintes, Tipo At, GAP e D, representam, respectivamente, tipo de aterramento, espaçamento entre os barramentos de cada fase e a distância típica de trabalho [10]. A coluna E apresenta os valores de energia incidente para cada barra e para cada tipo de curto (máx. e mín.). A penúltima coluna mostra a categoria de risco associada ao nível de energia incidente encontrado [4] e a última coluna mostra a distância segura a qual não seria necessário o uso de nenhuma vestimenta.

## 7.5 ANÁLISE DOS RESULTADOS E PROPOSTAS DE MITIGAÇÃO

Analisando a tabela 7.2 verifica-se que 5 barras foram classificadas com nível de energia incidente crítico (acima de 8 cal/cm<sup>2</sup>) dentre as 48 avaliadas. Apenas as barras B4 e B5 não apresentaram níveis críticos para as duas condições de curto-circuito, sendo que as barras B1, B2 e B3 ficaram acima de 8 cal/cm<sup>2</sup> para o curto-circuito máximo e mínimo. Pode-se notar também, comparando os valores de  $I_{bf}$  e  $I_a$ , como a resistência do arco elétrico reduz significativamente a corrente de falta. As 5 barras identificadas pertencem aos painéis de 5 subestações distintas (SE-B, SE-I, SE-IT, SE-AR e SE-BF). Apesar do trabalho apenas essas barras, as simulações e cálculos foram realizados para todas as barras da instalação.

Uma vez determinadas as barras críticas, faz-se necessário buscar medidas de redução do risco ao qual estão expostos as pessoas e equipamentos. Uma medida que pode ser adotada para redução dos riscos relacionados à energia incidente é a instalação de relé de proteção contra arco-

elétrico, capaz de desligar o disjuntor na presença de altas correntes e luz proveniente do arco, com um tempo de atuação mínimo, conforme apresentado no capítulo 6. Os relés monitores de arco elétrico atuam em cerca de 7 ms, pois não há necessidade de coordenação com nenhum outro dispositivo. Para a utilização destes relés é necessário fazer uma análise dos painéis existentes, verificando junto aos desenhos construtivos se há espaço e estrutura física para instalação dos módulos, sensores e cabos.

Outra medida para a redução da energia incidente é a redução do tempo de atuação da função “Tempo Curto” (tsd) dos disjuntores de entrada dos painéis. Entretanto, esta medida pode promover a descoordenação dos disjuntores de entrada com os dispositivos de proteção a jusante, em caso de curto-circuito. Cabe verificar se em termos do processo industrial essa solução pode ser aplicada. Abaixo segue uma proposta de solução para a redução dos níveis de energia através do uso dos relés de proteção contra arco elétrico e redução do tempo de atuação dos disjuntores de entrada (descoordenação). A tabela 7.3 apresenta os resultados considerando a adoção da temporização igual a 100 ms para os disjuntores das barras B3, B4 e B5 e a instalação de relés de proteção contra arco elétrico nas barras B1 e B2. A figura 7.5 mostra de forma gráfica os valores de energia incidente antes e depois das ações de mitigação.

Tabela 7.3 – Recomendação para redução dos níveis de energia incidente críticos

SE	Barra	Tensão kV	Tipo I <sub>cc</sub>	I <sub>bf</sub> kA	I <sub>bf<sub>ad</sub></sub> kA	I <sub>a</sub> kA	I <sub>ad</sub> kA	TRIP <sub>s</sub>	t <sub>a</sub> s	Tipo At	GAP mm	D mm	E cal/cm <sup>2</sup>	Cat. Risco	Db mm	Recomendação	TRIP <sub>1</sub> s	E <sub>1</sub> cal/cm <sup>2</sup>	Cat. Risco <sub>1</sub>
SE-B	B1	0,48	Máx (Γ <sup>k</sup> )	31,0	25,5	17,2	14,1	0,200	0,050	RAVO	25	455	19,50	3	2488	Instalação de relé de proteção contra arco elétrico (Atuação em 7ms)	0,007	4,45	2
			Mín (Ik)	18,6	18,6	11,1	11,1	0,200					10,23	3	1680				
SE-I	B2	0,48	Máx (Γ <sup>k</sup> )	36,0	28,6	19,6	16,1	0,220	0,050	RAVO	25	455	24,24	3	2841	Instalação de relé de proteção contra arco elétrico (Atuação em 7ms)	0,007	5,12	2
			Mín (Ik)	18,3	18,3	11,0	11,0	0,220					10,89	3	1744				
SE-IT	B3	0,44	Máx (Γ <sup>k</sup> )	29,7	23,4	15,2	12,5	0,250	0,050	Solidamente Aterrado	25	455	15,86	3	2194	Redução do tempo de atuação para 0,1s para 0,85.I <sub>ad</sub> mínimo (8,48kA)	0,100	7,93	2
			Mín (Ik)	17,8	17,8	9,98	9,98	0,250					8,39	3	1489				
SE-AR	B4	0,44	Máx (Γ <sup>k</sup> )	27,8	20,3	14,4	11,1	0,220	0,050	Solidamente Aterrado	25	455	13,45	3	1984	Redução do tempo de atuação para 0,1s para I <sub>ad</sub> máximo (11,1kA)	0,100	7,47	2
			Mín (Ik)	16,1	16,1	9,17	9,17	0,220					6,90	2	1322				
SE-BF	B5	0,44	Máx (Γ <sup>k</sup> )	21,8	20,6	11,8	11,3	0,250	0,050	Solidamente Aterrado	25	455	12,00	3	1851	Redução do tempo de atuação para 0,1s para I <sub>ad</sub> máximo (9,09kA)	0,100	6,00	2
			Mín (Ik)	15,9	15,9	9,09	9,09	0,250					7,59	2	1400				

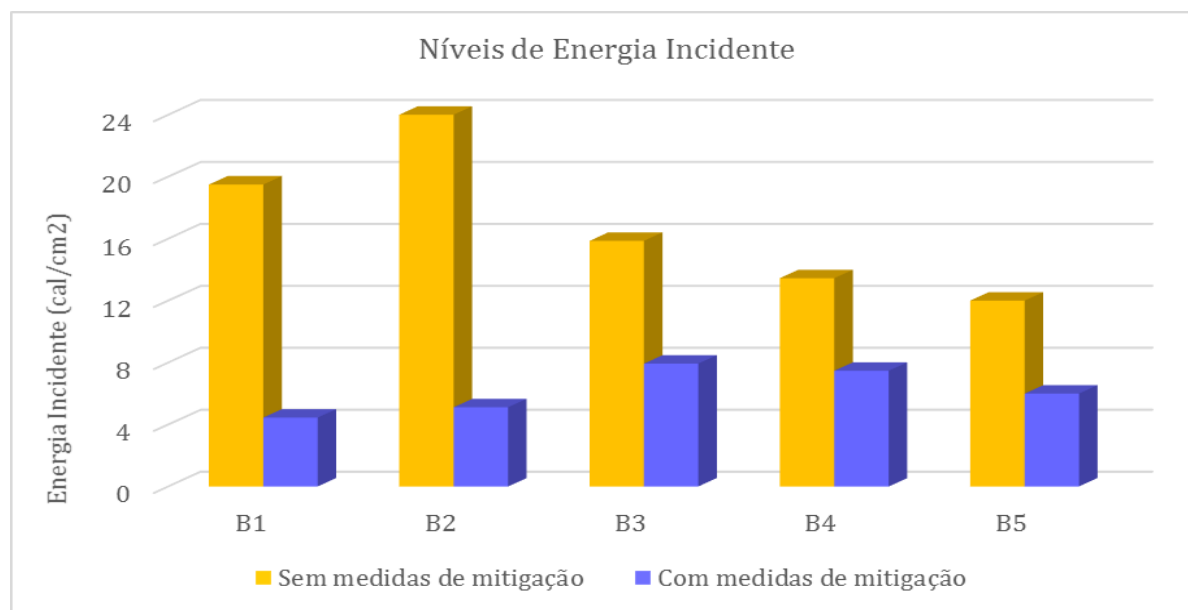


Figura 7.5 – Redução dos níveis de energia incidente – valores  $\leq 8\text{cal/cm}^2$

As recomendações propostas e apresentadas na tabela 7.3 e figura 7.5 atendem a premissa de reduzir os valores para categoria 2. A redução dos tempos de atuação para 100 ms para as barras B3, B4 e B5 proporcionam ainda alguma coordenação com a proteção instantânea dos motores à jusante, que podem chegar a um tempo de atuação de 50 ms. Dessa forma não se compromete por demais a seletividade de fase para essas barras. Vale ressaltar que a descoordenação é feita apenas para faltas trifásicas e os curtos circuitos são em sua maioria monofásicos o que atenua, em parte, a redução de tempo proposta. Para as barras B1 e B2 a redução dos tempos para 100 ms não reduziria a energia incidente para valores menores que  $8\text{cal/cm}^2$ , sendo necessário uma redução de tempo ainda maior. Assim sendo, optou-se pela instalação do relé de proteção contra arco elétrico como forma de reduzir a energia incidente. Essa ação proporcionou a redução dos valores para os níveis aceitáveis.

Os coordenogramas das 5 barras são apresentados abaixo 7.6 à 7.10. Ao lado desses vê-se o ramo do diagrama unifilar que traz os componentes relacionados ao coordenograma. Logo abaixo tem-se a linha da tabela 7.3 referente a respectiva barra. Os coordenogramas das barras 3, 4 e 5 mostram, além das curvas dos componentes do diagrama unifilar, duas linhas verticais (azul pontilhado) que representam as correntes de arco, para o curto-circuito máximo e mínimo. Com essa informação disponível no gráfico pode-se extrair facilmente o tempo de atuação para as correntes de arco elétrico.

Outro ponto que merece destaque é a importância da verificação do tempo de atuação para a corrente de curto-circuito mínimo que pode se dar em um tempo de atuação muito maior que o tempo da corrente máxima, interceptando a curva do disjuntor na parte inversa. A condição pode ser ainda mais desfavorável para os casos em que não haja proteção geral para a barra ou caso a falta ocorra entre o disjuntor de baixa tensão e o transformador. Nesses casos a interrupção da falta fica a cargo do fusível no primário do transformador que, para a corrente de curto-circuito mínima, terá um tempo de atuação substancialmente longo. Essa condição não é rara de se verificar na prática. A título de exemplo a atuação do fusível (P\_FU\_T02) atuará em um tempo próximo de 500 s para uma condição de curto-circuito mínimo nas conexões de entrada do disjuntor de baixa tensão.

### BARRA 1 (B1)

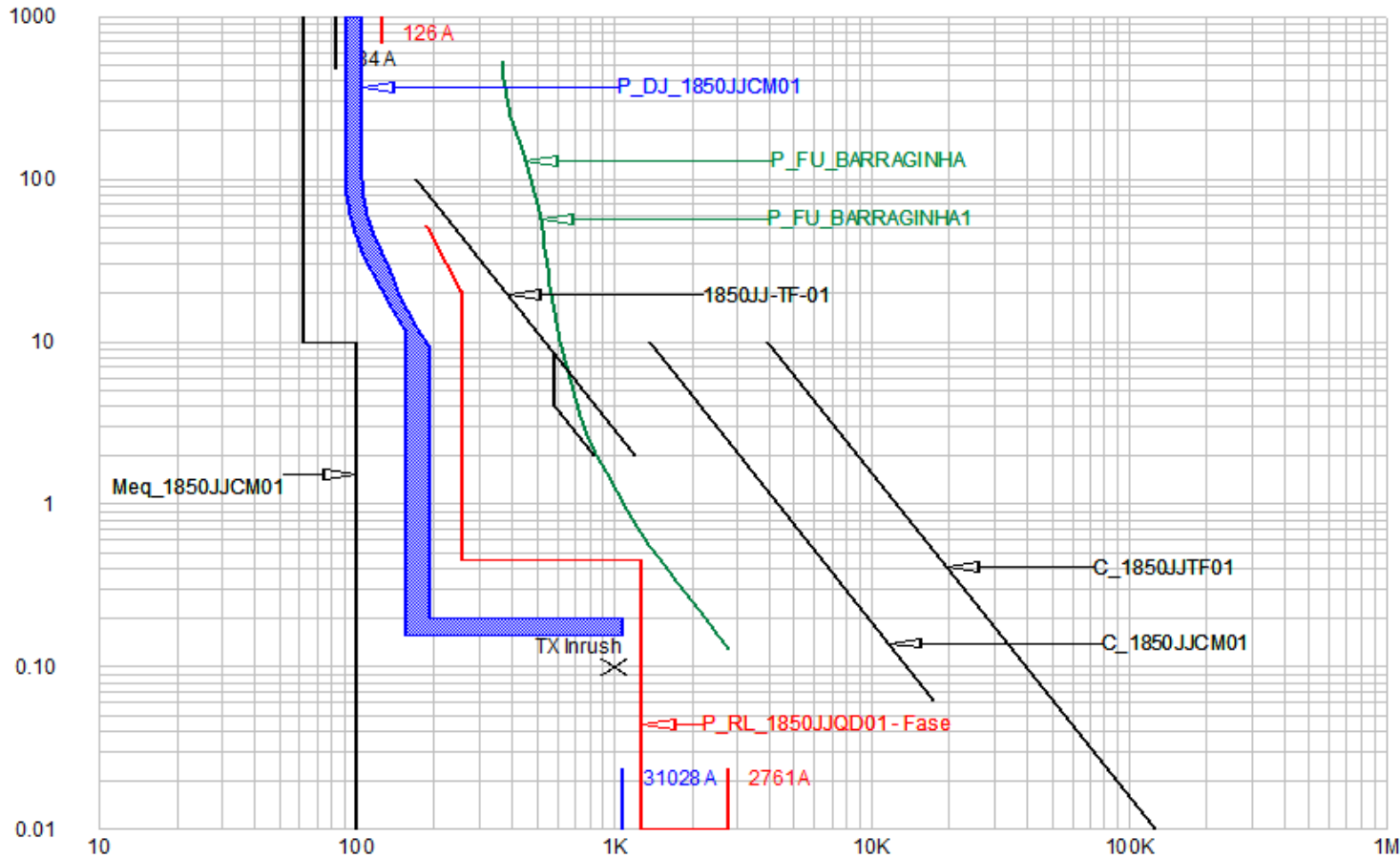
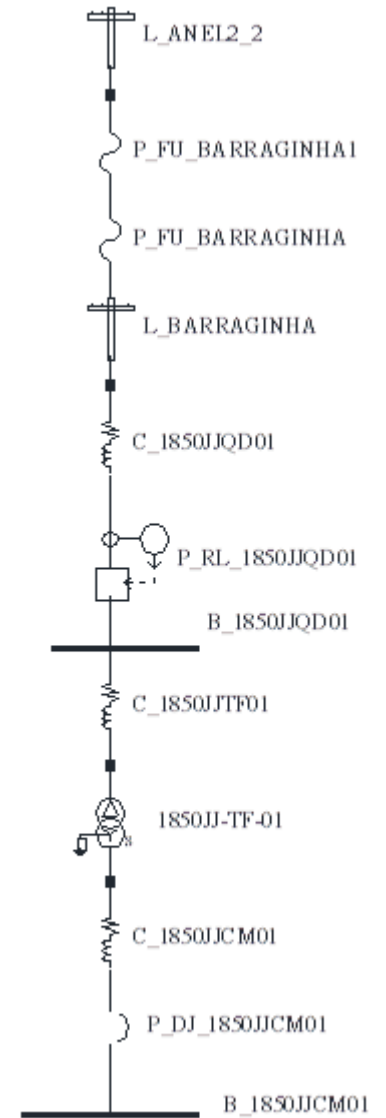


Figura 7.6 – Coordenograma Barra B1 / SE B – Referência: 13800V



Tensão kV	Tipo I <sub>cc</sub>	I <sub>bf</sub> kA	I <sub>bf</sub> <sub>a</sub> kA	I <sub>a</sub> kA	I <sub>a</sub> <sub>a</sub> kA	TRIP s	t <sub>a</sub> s	E cal/cm <sup>2</sup>	Cat. Risco	Db mm	Recomendação	TRIP <sub>1</sub> s	E <sub>1</sub> cal/cm <sup>2</sup>	Cat. Risco <sub>1</sub>
0,48	Máx (I <sup>”k</sup> )	31,0	25,5	17,2	14,1	0,200	0,050	19,50	3	2488	Instalação de relé de proteção contra arco elétrico (Atuação em 7 ms)	0,007	4,45	2
	Mín (Ik)	18,6	18,6	11,1	11,1	0,200		10,23	3	1680				

### BARRA 2 (B2)

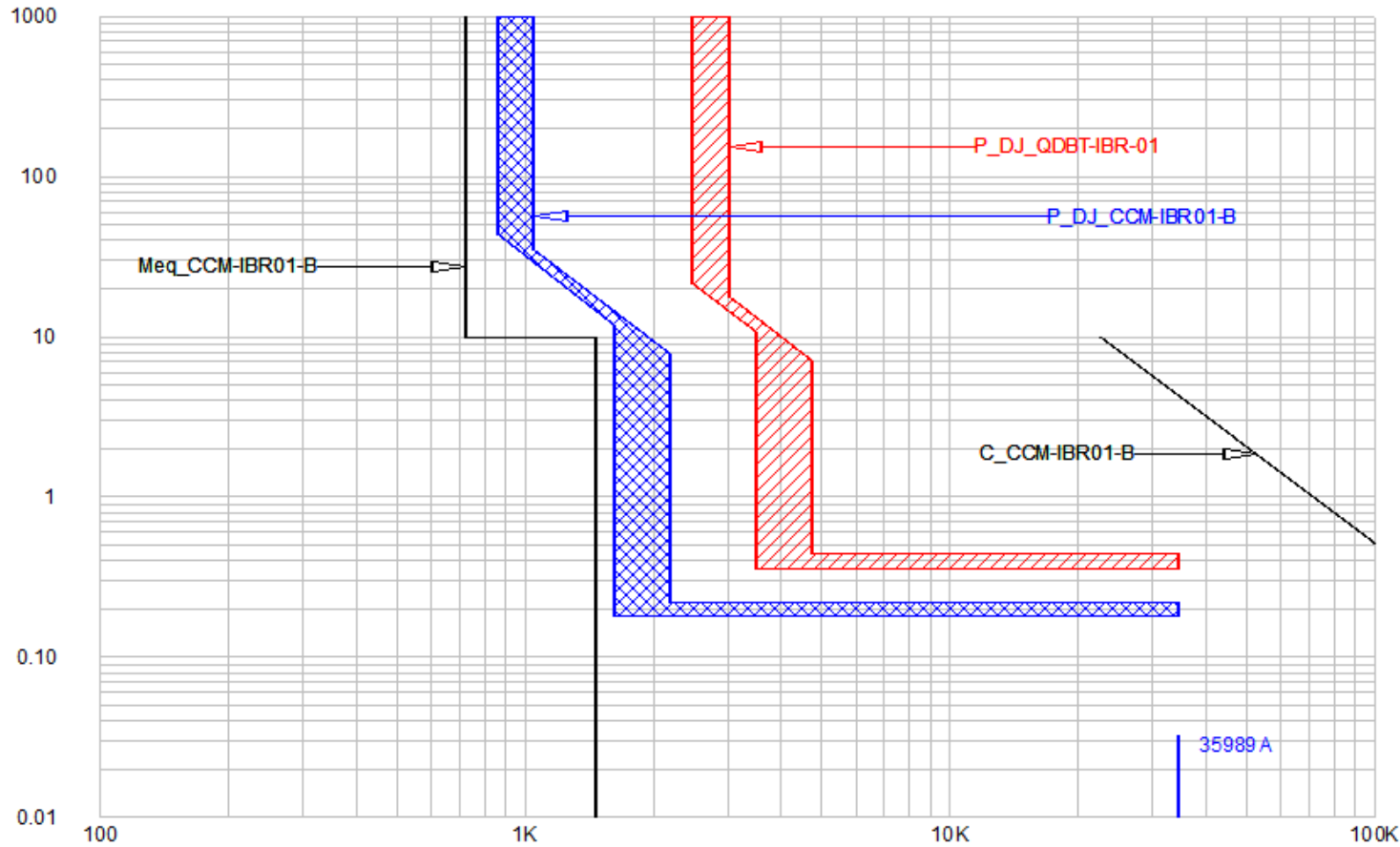
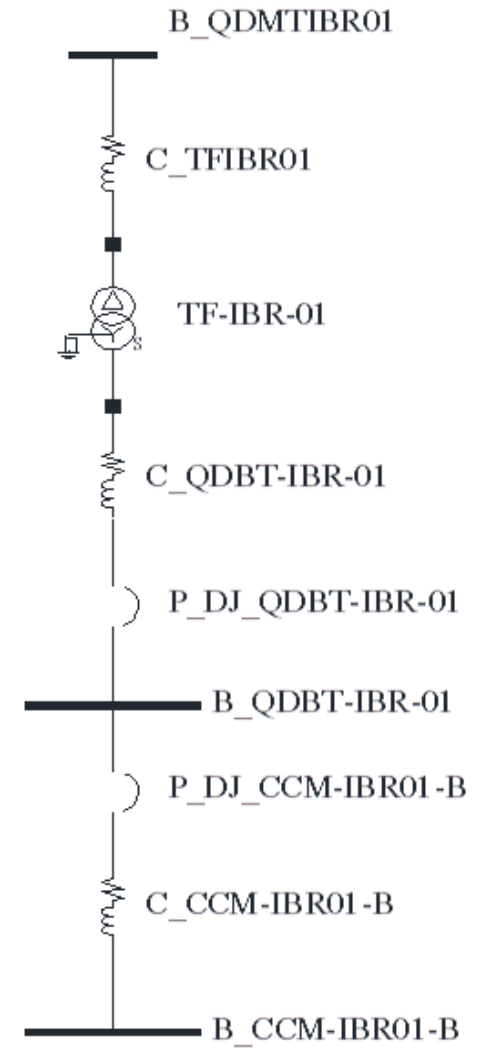


Figura 7.7 – Coordenograma Barra B2 / SE I – Referência: 480V



Tensão kV	Tipo I <sub>cc</sub>	I <sub>bf</sub> kA	I <sub>bf</sub> <sub>a</sub> kA	I <sub>a</sub> kA	I <sub>a</sub> <sub>a</sub> kA	TRIP s	t <sub>a</sub> s	E cal/cm <sup>2</sup>	Cat. Risco	Db mm	Recomendação	TRIP <sub>1</sub> s	E <sub>1</sub> cal/cm <sup>2</sup>	Cat. Risco <sub>1</sub>
0,48	Máx (I <sup>”</sup> k)	36,0	28,6	19,6	16,1	0,220	0,050	24,24	3	2841	Instalação de relé de proteção contra arco elétrico (Atuação em 7 ms)	0,007	5,12	2
	Mín (Ik)	18,3	18,3	11,0	11,0	0,220		10,89	3	1744				

### BARRA 3 (B3)

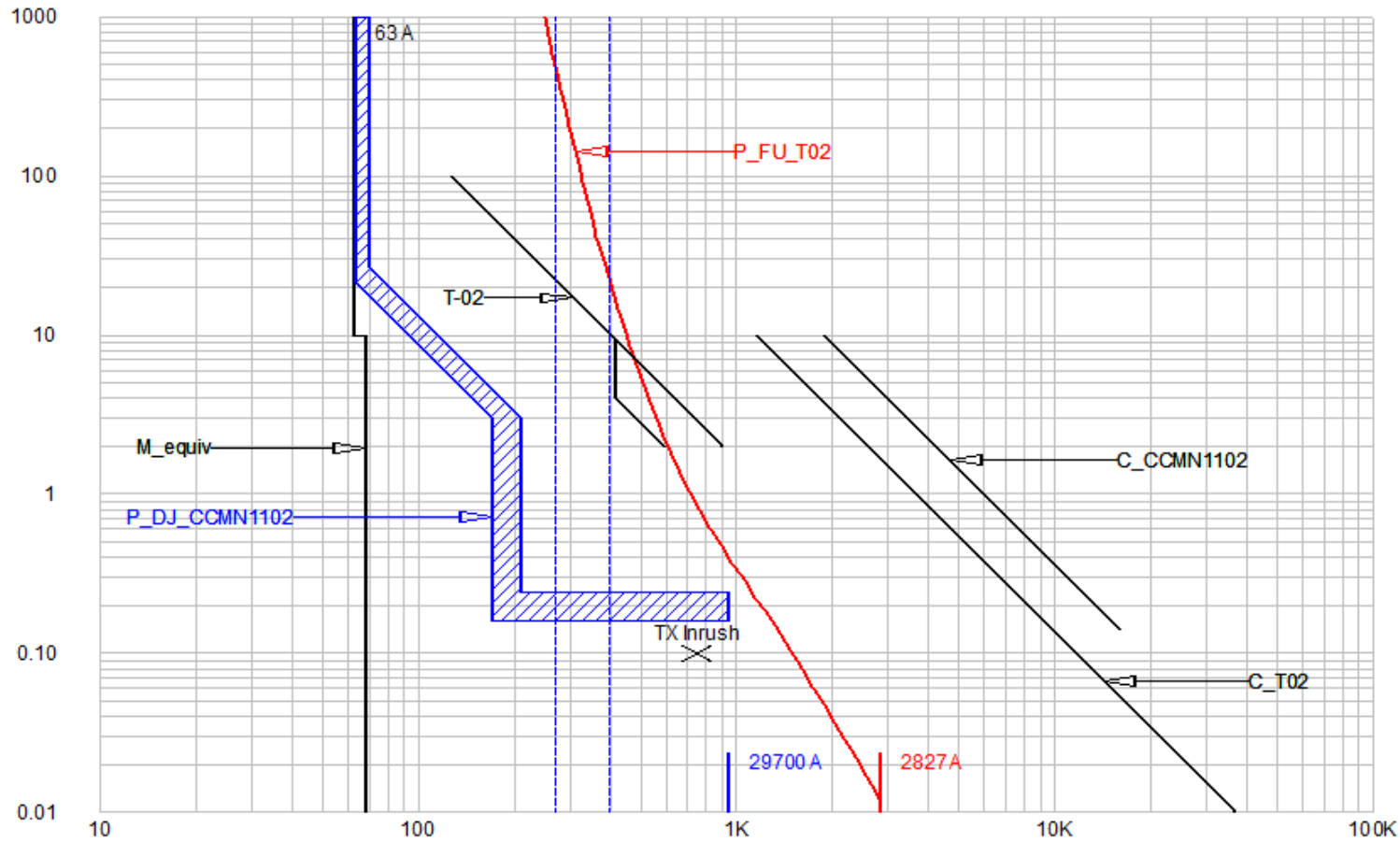
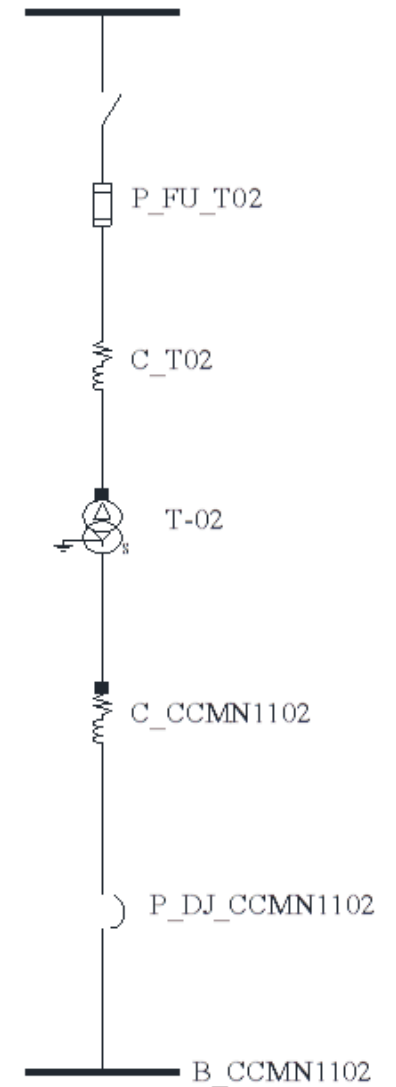


Figura 7.8 – Coordenograma Barra B3 / SE IT – Referência: 13800V



Tensão kV	Tipo I <sub>cc</sub>	I <sub>bf</sub> kA	I <sub>bf<sub>d</sub></sub> kA	I <sub>a</sub> kA	I <sub>ad</sub> kA	TRIP s	t <sub>a</sub> s	E cal/cm <sup>2</sup>	Cat. Risco	Db mm	Recomendação	TRIP <sub>1</sub> s	E <sub>1</sub> cal/cm <sup>2</sup>	Cat. Risco <sub>1</sub>
0,44	Máx (Γ <sup>k</sup> )	29,7	23,4	15,2	12,5	0,250	0,050	15,86	3	2194	Redução do tempo de atuação para 0,1 s para 0,85.I <sub>ad</sub> mínimo (8,48 kA)	0,100	7,93	2
	Mín (Ik)	17,8	17,8	9,98	9,98	0,250		8,39	3	1489				



### BARRA 4 (B4)

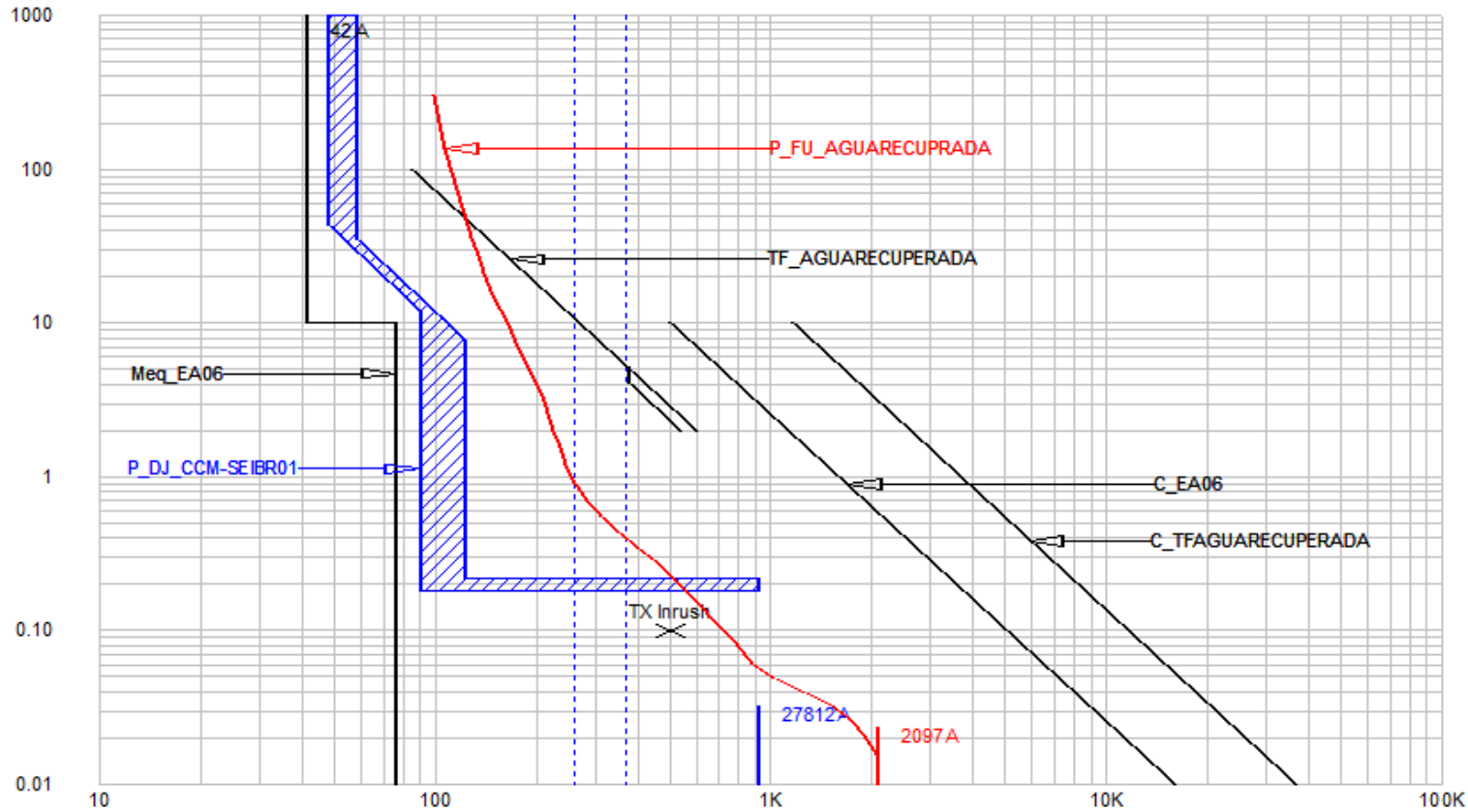
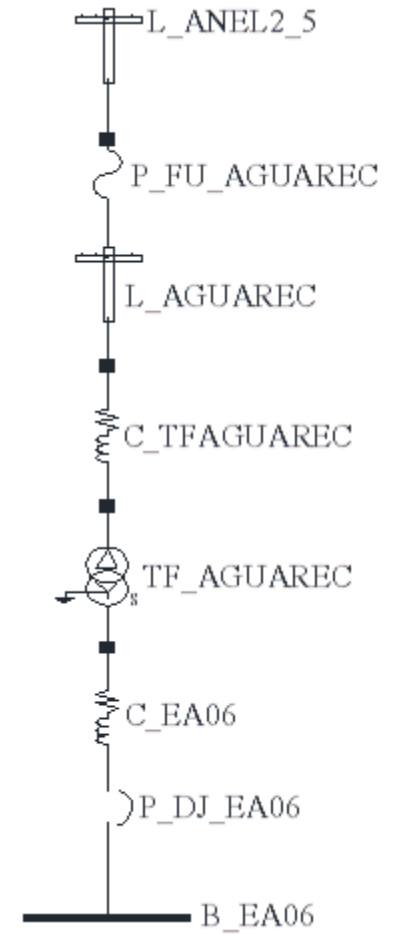


Figura 7.9 – Coordenograma Barra B4 / SE AR – Referência: 13800V



Tensão kV	Tipo I <sub>cc</sub>	I <sub>bf</sub> kA	I <sub>bf<sub>d</sub></sub> kA	I <sub>a</sub> kA	I <sub>ad</sub> kA	TRIP s	t <sub>a</sub> s	E cal/cm <sup>2</sup>	Cat. Risco	Db mm	Recomendação	TRIP <sub>1</sub> s	E <sub>1</sub> cal/cm <sup>2</sup>	Cat. Risco <sub>1</sub>
0,44	Máx (I <sup>”</sup> k)	27,8	20,3	14,4	11,1	0,220	0,050	13,45	3	1984	Redução do tempo de atuação para 0,1 s para I <sub>ad</sub> máximo (11,1 kA)	0,100	7,47	2
	Mín (Ik)	16,1	16,1	9,17	9,17	0,220		6,90	2	1322				

### BARRA 5 (B5)

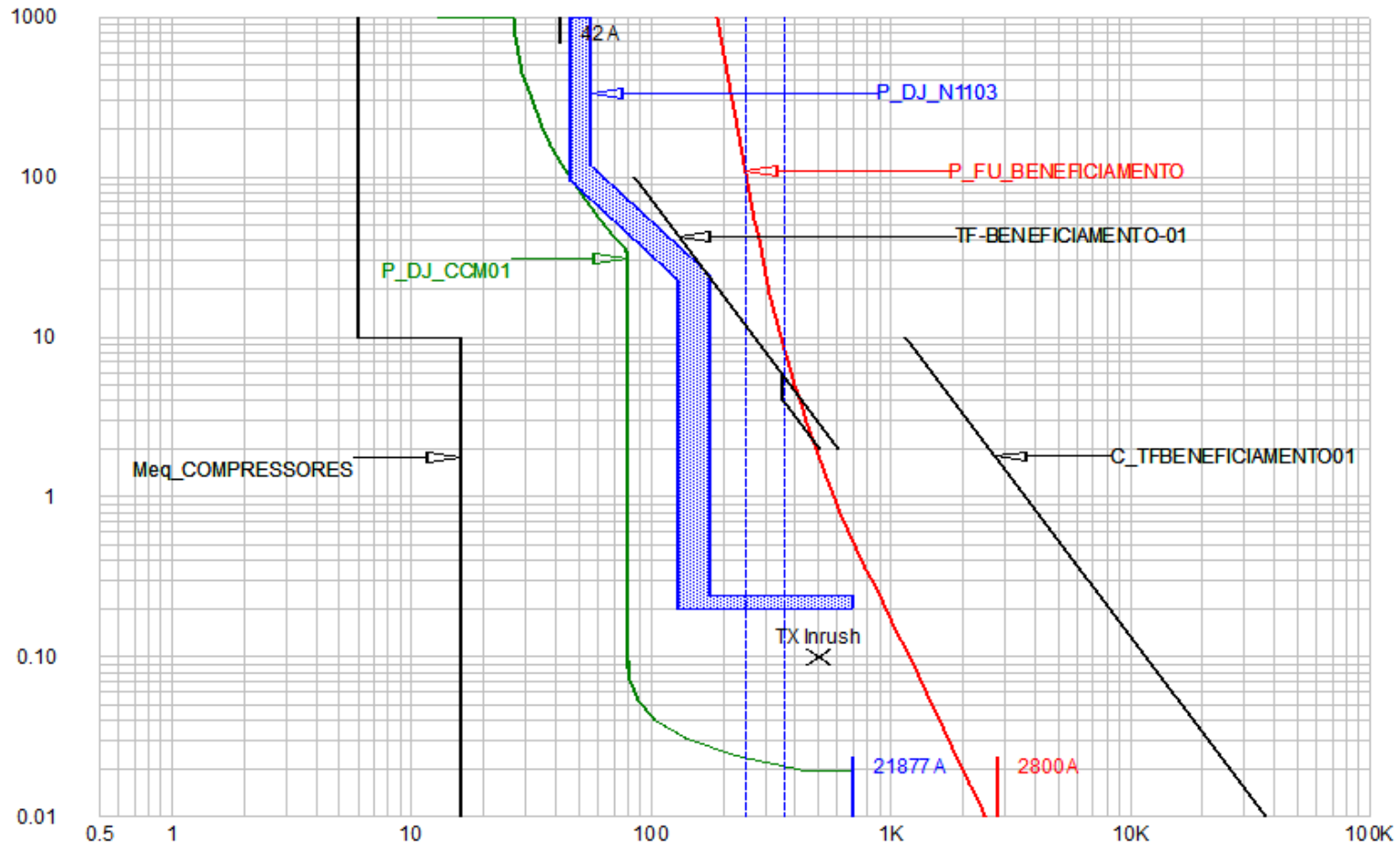
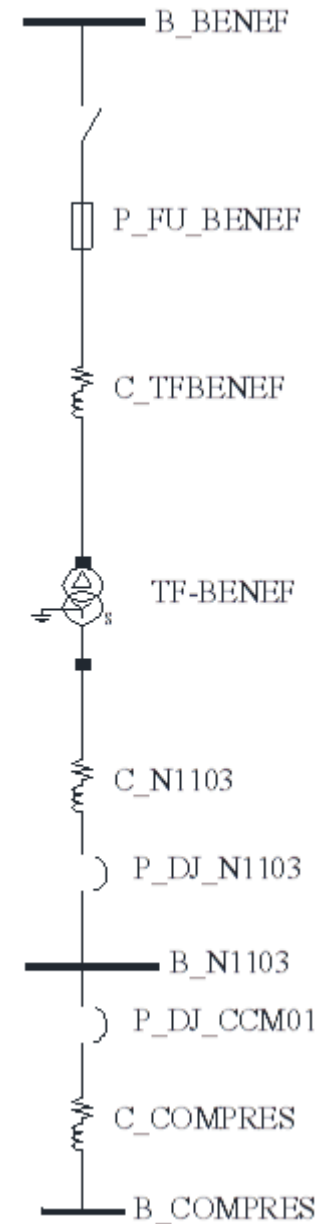


Figura 7.10 – Coordenograma Barra B5 / SE BF - Referência: 13800V



Tensão kV	Tipo I <sub>cc</sub>	I <sub>bf</sub> kA	I <sub>bf<sub>d</sub></sub> kA	I <sub>a</sub> kA	I <sub>ad</sub> kA	TRIP s	t <sub>a</sub> s	E cal/cm <sup>2</sup>	Cat. Risco	Db mm	Recomendação	TRIP <sub>1</sub> s	E <sub>1</sub> cal/cm <sup>2</sup>	Cat. Risco <sub>1</sub>
0,44	Máx	21,8	20,6	11,8	11,3	0,250	0,050	12,00	3	1851	Redução do tempo de atuação para 0,1 s para 0,85·I <sub>ad</sub> mínimo (7,73 kA)	0,100	6,00	2
	Mín	15,9	15,9	9,09	9,09	0,250		7,59	3	1400				

## 7.6 CONCLUSÃO

Para determinar a energia incidente dos pontos de uma referida instalação elétrica é necessário levantar uma série de dados dessa instalação bem como realizar alguns cálculos ou mesmo simulações se necessário. A energia incidente é função da corrente de curto-circuito no ponto e do tempo de duração do arco elétrico. Dessa forma, faz-se necessário realizar o cálculo de curto-circuito do sistema através de metodologia referendada por norma bem como definir os ajustes dos dispositivos de proteção, conforme estudo de seletividade.

No presente estudo de caso utilizou-se, com auxílio do software SKM, a norma IEC-60909 [9] como referência para determinar as correntes de curto-circuito. Os ajustes de seletividade foram determinados também com a contribuição do software. Foi definido, conforme [10], a corrente subtransitória simétrica para o cálculo da energia incidente e considerado o período de duração da falta, os tempos de atuação do dispositivo somado com o tempo de abertura do disjuntor.

A energia incidente foi calculada para as 48 barras da instalação sendo que 5 apresentaram níveis de energia incidente crítico (categoria  $> 2$ ). Foi então utilizado os recursos apresentados no capítulo 6 como forma de reduzir a energia incidente. Para três das cinco barras foi utilizado o recurso de redução dos ajustes de sobrecorrente, com resultado satisfatório e sem perda de seletividade. Para as demais barras, que apresentaram os maiores níveis, foi definida a solução com o uso do relé de proteção contra arco elétrico, sendo também satisfatória essa proposta. O relé de arco apresenta uma solução mais eficaz devido ao rápido tempo de atuação, contudo demanda mais recursos para a sua implementação que a simples otimização dos ajustes de proteção.

# CAPÍTULO 8

## CONCLUSÃO

### 8.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O elevado número de acidentes envolvendo fatalidades, lesões incapacitantes e danos ao patrimônio das empresas, levaram ao estudo mais profundo do fenômeno do arco elétrico e seus desdobramentos, em especial a energia incidente. Desde as primeiras abordagens apresentadas por Ralph Lee, muito se evoluiu no conhecimento do arco elétrico, bem como nas medidas de controle dos riscos associados ao mesmo. Contudo o número de acidentes é ainda considerável mostrando a necessidade de aperfeiçoar as técnicas de controle de riscos. As normas internacionais, em especial as americanas e europeias, já oferecem um volume de informação significativo sobre o assunto. No Brasil, contudo, faz-se necessário desenvolver normas mais bem detalhadas sobre a energia incidente e as medidas de proteção, bem como das técnicas para confecção e ensaios de vestimentas antichama.

A modelagem de um arco elétrico mostrou-se uma tarefa não muito simples, devido ao seu comportamento dinâmico e caótico. A ocorrência de um arco traz consigo uma série de perigos para as pessoas no seu entorno, sendo eles, calor propagado, ondas de pressão, ruído de alta intensidade, projeção de estilhaços e material derretido. Dentre esses riscos, aquele que historicamente trouxe maiores prejuízos a integridade física dos trabalhadores está relacionado com o calor liberado durante a explosão. Esse calor é também conhecido como energia incidente.

Para determinar a energia incidente, foram apresentadas várias metodologias de cálculo, desenvolvidas ao longo das últimas três décadas. Esses métodos de cálculo possuem limites de aplicação, de forma que pode ser mais vantajosos o uso de um em detrimento do outro, dependendo da situação. O método de Ralph Lee, por exemplo, se mostra uma boa metodologia quando se tem poucos dados disponíveis. O método ArcPro ocupa um lugar de destaque para as aplicações envolvendo o sistema elétrico de alta e extra alta tensão. Dentre esses métodos, o uso da metodologia IEEE-1584 ocupa um lugar de destaque no ambiente industrial, sendo utilizada em larga escala, dentro dos seus limites de aplicação.

As formas de proteção do trabalhador contra os efeitos térmicos da energia incidente são variados, passando pela eliminação do risco até o uso de vestimentas antichama, que constitui a última barreira de proteção para o indivíduo. Ações que atuem na redução da corrente de curto-circuito e no tempo de atuação da proteção se mostram bastante efetivas como forma de reduzir a energia incidente, uma vez que a energia liberada é proporcional a essas duas grandezas. A última delas, mais prática para as plantas já em operação, foi aplicada nesse trabalho.

No estudo de caso apresentado nesse trabalho utilizou-se ações de redução do tempo de atuação da proteção como forma de reduzir os níveis de energia incidente em 5 barras de uma

unidade industrial. Dentre as 5 barras mapeadas 3 delas tiveram seus níveis de energia reduzidos através da modificação dos ajustes dos disjuntores. Para as 2 barras restantes utilizou-se relés proteção contra arco elétrico.

Por fim, conclui-se que controlar riscos associados à energia incidente de uma instalação elétrica requer uma série de ações que precisam ser impreterivelmente tomadas. É necessário fazer levantamento em campo (dados da fonte, cabos, transformadores, motores, topologia do sistema, dentre outros), realizar o cálculo de curto-circuito, levantar os tempos de atuação das proteções baseado no estudo de seletividade, calcular os níveis de energia incidente, definir as ações de mitigação dos riscos com base nos valores encontrados e nas referências normativas, especificar as vestimentas antichama de acordo com o nível de energia incidente encontrado.

## **8.2 PROPOSTA DE CONTINUIDADE**

Uma proposta de continuidade para esse trabalho consiste em avaliar a variação da energia incidente conforme se alteram as variáveis envolvidas no cálculo. Sabe-se que a energia incidente é função da corrente de curto-circuito no ponto estudado. Atualmente existem mais de uma metodologia para determinar a corrente de curto-circuito, IEC, ANSI, COMPRENSIVE, dentre outras. Assim, é possível avaliar as diferenças encontradas no nível de energia incidente para as diferentes correntes de curto-circuito. Ressalta-se que a própria magnitude da energia incidente possui mais de uma forma cálculo, conforme apresentado no capítulo 3. Um estudo sobre a variação dos resultados, conforme a escolha do método, pode também ser feito e comparado. Por fim, há também variações oriundas do próprio sistema, como, erros de transformadores de corrente (até 10% para proteção), mudança de TAP de transformadores, atrasos de relés de proteção, variação no tempo de abertura de disjuntores, dentre outros. Essa ponderação é válida principalmente para a avaliação e especificação das vestimentas antichama. O tecido que compõe as vestimentas apresentam, normalmente, grande variação no nível de proteção para uma pequena variação na energia incidente, o que maximiza a probabilidade de queimaduras durante a ocorrência do arco elétrico.

Outra oportunidade, oferecida pelos relés digitais, é o cálculo da energia incidente por meio de algoritmo implementado no equipamento. Uma vez que o relé digital realize registros de oscilografia das faltas, é possível utilizar os valores de corrente de curto-circuito reais para determinar a energia incidente, desde que os dados necessários ao cálculo (fator de distância, tipo de aterramento, tempo de abertura do disjuntor, etc.) sejam inseridos previamente no relé.

## ANEXO

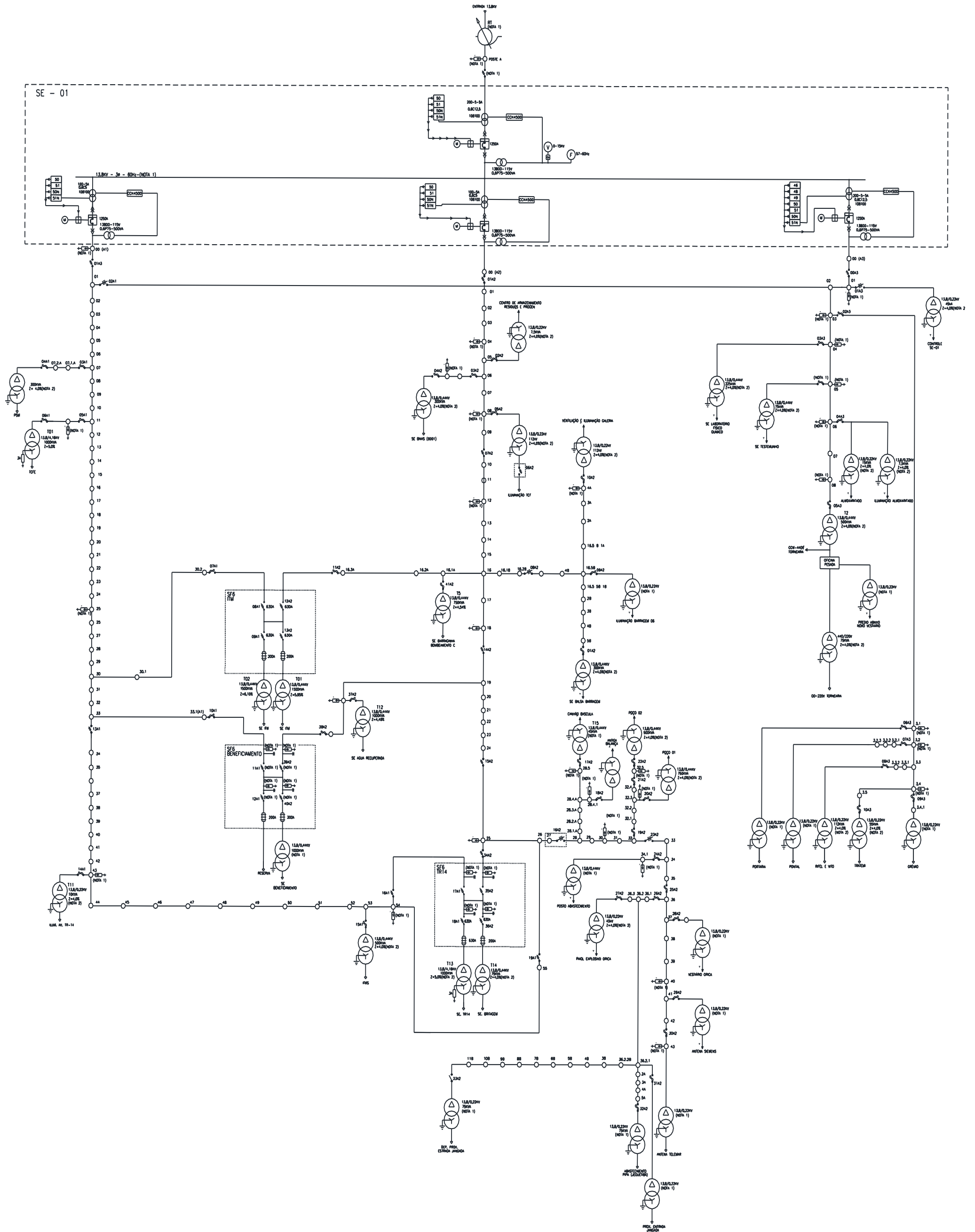
### A.1 CURTO-CIRCUITO TRIFÁSICO

CURTO-CIRCUITO TRIFÁSICO									
BARRA	(V)	Ip (kA)	I''k Asym (kA)	I''k (kA)	Ib Asym (kA)	Ib (kA)	Ik (kA)	Idc (kA)	R/X
B_1850JJQD01	13800	5,453	2,706	2,65	2,438	2,436	1,247	0,117	0,4615
B_BENEFICIAMENTO	13800	5,586	2,758	2,697	2,468	2,465	1,225	0,128	0,4507
B_ITM	13800	5,629	2,783	2,72	2,484	2,48	1,232	0,134	0,4543
B_QDMTIBR01	13800	5,45	2,698	2,648	2,423	2,42	1,198	0,118	0,4622
B_SE01	13800	5,29	3,024	2,929	2,705	2,7	1,389	0,169	0,458
B_SF6TR14	13800	5,582	2,759	2,679	2,446	2,439	1,206	0,183	0,4489
B_TCF	13800	5,685	2,826	2,759	2,547	2,544	1,3	0,139	0,4646
B_INVERSOR	4160	7,05	3,472	2,865	2,808	2,693	1,736	0,793	0,2315
B_PNMT1/2	4160	7,44	3,636	3,129	2,963	2,892	1,782	0,645	0,2678
<b>B_1850JCCM01</b>	<b>480</b>	<b>56,084</b>	<b>35,362</b>	<b>31,175</b>	<b>23,382</b>	<b>23,062</b>	<b>16,378</b>	<b>3,855</b>	<b>0,2955</b>
B_CCM-IBR-02A	480	47,293	24,068	23,435	22,525	22,511	14,763	0,784	0,4967
B_CCM-IBR-02B	480	46,092	23,522	22,94	22,075	22,064	14,566	0,72	0,505
B_CCM-IBR01-A	480	71,253	34,731	32,08	30,015	29,826	17,648	3,363	0,348
<b>B_CCM-IBR01-B</b>	<b>480</b>	<b>71,846</b>	<b>39,363</b>	<b>36,294</b>	<b>30,159</b>	<b>29,959</b>	<b>17,648</b>	<b>3,469</b>	<b>0,3462</b>
B_CCMTR14	480	23,442	12,732	12,815	12,23	12,229	9,113	0,123	0,7644
B_QDBT-IBR-01	480	77,835	37,838	34,233	31,766	31,413	18,461	4,727	0,3219
B_BARRAGEM	440	20,425	10,032	8,831	8,711	8,607	7,615	1,344	0,2975
B_CCM124C01	440	30,744	14,984	13,322	12,626	12,454	9,235	2,078	0,3033
<b>B_CCMN1102</b>	<b>440</b>	<b>68,759</b>	<b>33,608</b>	<b>29,742</b>	<b>28,237</b>	<b>27,759</b>	<b>17,776</b>	<b>5,175</b>	<b>0,2896</b>
B_COMPRESSORES	440	24,702	13,11	13,081	12,551	12,55	10,139	0,181	0,6532
B_EA01	440	11,084	5,369	4,908	4,509	4,465	3,606	0,626	0,3285
B_EA01_05	440	59,027	29,091	27,532	26,018	25,944	15,437	1,958	0,3966
<b>B_EA06</b>	<b>440</b>	<b>62,567</b>	<b>30,675</b>	<b>27,812</b>	<b>26,278</b>	<b>26,037</b>	<b>16,048</b>	<b>3,553</b>	<b>0,3296</b>
B_EB08	440	73,214	35,541	33,13	30,59	30,411	16,938	3,299	0,355
B_GREMIO	440	7,563	4,303	3,779	3,809	3,77	3,613	0,545	0,3029
B_LABFIS-QUIM	440	6,243	3,651	3,442	3,439	3,434	3,3	0,178	0,439
B_N1101	440	27,716	13,473	12,122	11,28	11,141	7,398	1,763	0,315
B_N1101-1	440	59,027	29,091	27,532	26,018	25,944	15,437	1,958	0,3966
B_N1101-2	440	59,027	29,091	27,532	26,018	25,944	15,437	1,958	0,3966
B_N11011	440	59,027	29,091	27,532	26,018	25,944	15,437	1,958	0,3966
<b>B_N1103</b>	<b>440</b>	<b>49,934</b>	<b>24,484</b>	<b>21,828</b>	<b>21,193</b>	<b>20,951</b>	<b>15,904</b>	<b>3,194</b>	<b>0,3032</b>
B_OFPESADA_C1	440	27,275	15,616	14,233	14,169	14,104	12,103	1,356	0,3577
B_PABASTECIMENTO	440	3,398	1,694	1,533	1,539	1,531	1,498	0,155	0,3499
B_PEXPLOSIVOS	440	5,635	2,797	2,497	2,51	2,492	2,406	0,301	0,3267
B_PNLN1101	440	19,98	9,784	8,755	8,434	8,344	7,076	1,231	0,318
B_QGBTN1101	440	81,476	39,462	36,04	32,668	32,301	17,8	4,886	0,3313
B_RIFELVITO	440	7,574	4,309	3,783	3,813	3,774	3,617	0,548	0,3023
B_RUTTHZWD	440	72,725	35,373	33,134	30,572	30,417	16,895	3,072	0,3636
B_SE_ALMOXARIFADO	440	5,045	2,879	2,563	2,578	2,559	2,485	0,318	0,3229
B_SEMPEL	440	71,037	34,637	32,56	29,945	29,808	16,475	2,869	0,3721
B_SEMPELCOL10	440	54,639	27,572	27,133	25,362	25,346	15,014	0,909	0,5013
B_TF1500kVA	440	55,801	27,277	23,965	23,236	22,9	16,516	3,933	0,291
B_TF150kVA	440	12,943	6,304	5,653	5,363	5,302	4,542	0,803	0,3112
B_ANTSIEMENS	220	11,248	5,583	4,985	5,011	4,975	4,807	0,599	0,3271
B_ANTTELEMAR	220	11,248	5,583	4,985	5,011	4,975	4,807	0,599	0,3271
B_ANTVIVO	220	11,248	5,583	4,985	5,011	4,975	4,807	0,599	0,3271
B_TC-IBR-01	220	3,14	1,628	1,565	1,564	1,564	1,537	0,048	0,5079
B_TL-IBR-01	220	3,552	1,783	1,642	1,645	1,64	1,612	0,129	0,3837
B_TRATEMI	220	7,389	4,226	3,796	3,815	3,792	3,71	0,422	0,3372
B_VCENTRAL	220	29,897	16,954	14,568	14,734	14,5	13,391	2,615	0,2737

## A.2 CURTO-CIRCUITO MONOFÁSICO

CURTO-CIRCUITO MONOFÁSICO									
BARRA	(V)	Ip (kA)	I''k Asym (kA)	I''k (kA)	Ib Asym (kA)	Ib (kA)	Ik (kA)	Idc (kA)	R/X
B_1850JJQD01	13800	2,070	1,035	1,080	0,881	1,080	1,080	0,016	0,607
B_BENEFICIAMENTO	13800	2,056	0,997	1,068	0,827	1,068	1,068	0,017	0,597
B_ITM	13800	2,071	1,049	1,079	0,883	1,079	1,079	0,016	0,603
B_QDMTIBR01	13800	2,013	0,963	1,045	0,792	1,045	1,045	0,017	0,596
B_SE01	13800	2,004	1,935	1,224	1,756	1,224	1,224	0,012	0,655
B_SF6TR14	13800	2,028	1,023	1,051	0,850	1,051	1,051	0,017	0,590
B_TCF	13800	2,163	1,057	1,139	0,894	1,139	1,139	0,014	0,630
B_INVERSOR	4160	7,247	2,996	2,907	2,341	2,907	2,907	0,807	0,216
B_PNMT1/2	4160	7,468	3,165	3,076	2,485	3,076	3,076	0,696	0,243
B_1850JJC01	480	0,005	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,000	757,790
B_CCM-IBR-02A	480	0,005	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,000	91,396
B_CCM-IBR-02B	480	0,005	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,000	91,378
B_CCM-IBR01-A	480	0,005	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,000	91,621
B_CCM-IBR01-B	480	0,005	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,000	91,624
B_CCMTR14	480	0,005	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,000	90,748
B_QDBT-IBR-01	480	0,005	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,000	91,668
B_BARRAGEM	440	21,551	7,261	9,183	6,169	9,183	9,183	1,573	0,280
B_CCM124C01	440	30,392	11,659	12,983	9,568	12,983	12,983	2,175	0,283
B_CCMN1102	440	73,704	28,492	30,660	23,265	30,660	30,660	6,413	0,253
B_COMPRESSORES	440	25,000	9,616	13,375	9,050	13,375	13,375	0,116	0,675
B_EA01	440	10,348	4,024	4,544	3,261	4,544	4,544	0,595	0,316
B_EA01_05	440	3,335	0,821	2,010	1,156	2,010	2,010	0,000	14,277
B_EA06	440	64,185	26,212	27,794	21,928	27,794	27,794	4,132	0,299
B_EB08	440	3,359	1,012	2,025	1,634	2,025	2,025	0,000	16,677
B_GREMIO	440	7,694	2,916	3,837	2,576	3,837	3,837	0,564	0,300
B_LABFIS-QUIM	440	6,338	2,469	3,492	2,324	3,492	3,492	0,182	0,438
B_N1101	440	29,020	11,654	12,628	9,543	12,628	12,628	1,798	0,304
B_N1101-1	440	3,335	0,821	2,010	1,156	2,010	2,010	0,000	14,277
B_N1101-2	440	3,335	0,821	2,010	1,156	2,010	2,010	0,000	14,277
B_N11011	440	3,335	0,821	2,010	1,156	2,010	2,010	0,000	14,277
B_N1103	440	54,518	18,527	23,360	15,676	23,360	23,360	3,811	0,286
B_OFPESADA_C1	440	29,299	11,148	15,169	10,039	15,169	15,169	1,564	0,347
B_PABASTECIMENTO	440	3,443	1,144	1,551	1,038	1,551	1,551	0,159	0,348
B_PEXPLOSIVOS	440	5,760	1,904	2,546	1,705	2,546	2,546	0,314	0,324
B_PNLN1101	440	19,988	7,143	8,691	6,033	8,691	8,691	1,246	0,304
B_QGBTN1101	440	3,369	2,339	2,031	2,227	2,031	2,031	0,000	17,984
B_RIFELVITO	440	7,702	2,919	3,839	2,578	3,839	3,839	0,566	0,300
B_RUTTHZWD	440	3,357	0,954	2,024	1,437	2,024	2,024	0,000	16,712
B_SE_ALMOXARIFADO	440	5,109	1,942	2,591	1,737	2,591	2,591	0,326	0,321
B_SEMPEL	440	3,353	1,075	2,021	1,169	2,021	2,021	0,000	16,345
B_SEMPEL010	440	3,312	0,870	1,996	0,633	1,996	1,996	0,000	14,585
B_TF1500kVA	440	64,349	22,677	26,864	18,658	26,864	26,864	5,459	0,257
B_TF150kVA	440	12,760	4,637	5,531	3,825	5,531	5,531	0,815	0,300
B_ANTSIEMENS	220	11,504	3,804	5,085	3,406	5,085	5,085	0,626	0,324
B_ANTELEMAR	220	11,504	3,804	5,085	3,406	5,085	5,085	0,626	0,324
B_ANTVIVO	220	11,504	3,804	5,085	3,406	5,085	5,085	0,626	0,324
B_TC-IBR-01	220	3,315	1,131	1,611	1,074	1,611	1,611	0,070	0,462
B_TL-IBR-01	220	3,609	1,206	1,662	1,110	1,662	1,662	0,136	0,378
B_TRATEMI	220	7,452	2,840	3,825	2,562	3,825	3,825	0,429	0,336
B_VCENTRAL	220	30,904	11,672	14,987	10,098	14,987	14,987	2,802	0,268

# A.3 DIAGRAMA UNIFILAR DA INSTALAÇÃO





## A.4 ROTINA EM MATLAB PARA O CÁLCULO DA ENERGIA INCIDENTE

```

% UFMG - Dissertação de Mestrado
% Cálculo de Energia Incidente
% Filipe Barcelos Resende - set/2016
% O programa en_inc retorna os valores de energia incidente (E) e da
% corrente limitada por arco elétrico (Ia) a partir dos dados abaixo:
% [E Ia] = en_inc(V,Ibf,tr,A)
% V = tensão do sistema (kV)
% Ibf = Icc simétrica eficaz (kA)
% tr = tempo de atuação do relé para a corrente limitada por arco (s)
% A --> Define o tipo de aterramento
%   A = 0 -> Não Aterrado ou RAVO
%   A = 1 -> Solidamente Aterrado ou RBVO
% !!! MUDAR O TEMPO 'tdj' NO PROGRAMA DE ACORDO COM
% O DISJUNTOR !!!
clear all
close all
clc
Msg1 = {'Tensão do sistema [kV]:' 'Corrente de Curto-Circuito [kA]:'...
        'Tipo de Aterramento'};
Titulo = 'Cálculo da corrente limitada por arco elétrico - Ia';
NumLinhas = 1;
ValPreDef = {'0' '0' '0'};
Dados1 = inputdlg (Msg1, Titulo, NumLinhas, ValPreDef);
V = str2num(cell2mat(Dados1(1,1)));
Ibf = str2num(cell2mat(Dados1(2,1)));
A = str2num(cell2mat(Dados1(3,1)));
K = -0.097; % valor de K para configurações fechadas
K1 = -0.555; % valor de K1 para configurações fechadas
Eb = 1.2; % valor de energia incidente que não causa
% queimaduras do 2º grau em cal/cm2
if A==0 % tipo de aterramento
    K2=0; % sistemas c/ neutro isolado ou aterrado através de
        % impedância de alto valor ôhmico
else
    K2=-0.113; % sistemas solidamente aterrados ou aterrados através de
        % impedância de baixo valor ôhmico
end
if V<=1
    D=455; % Distância típica de trabalho (mm)
    x=1.641; % fator de distância (CCM e painéis BT 0,208-1kV)
    G=25; % Espaçamento típico entre os barramentos (mm)
    tdj=0.050; % tempo típico caixa aberta (s)
    Cf=1.5; % fator de cálculo para tensão
Ia=10^(K+0.662*log10(Ibf)+0.0966*V+0.000526*G+0.5588*V*log10(
Ibf)-...
0.00304*G*log10(Ibf)); % corrente limitada por arco-BT
else
    D=910; % Distância típica de trabalho (mm)
    x=0.973; % fator de distância (MT 1-15kV)
    tdj=0.080; % tempo de abertura do disjuntor em MT (s)
    Cf=1; % fator de cálculo para tensão
if V < 5
    G = 102; % Espaçamento típico entre os barramentos (mm)
else
    G = 153; % Espaçamento típico entre os barramentos (mm)
end
Ia = 10^((0.00402)+0.983*log10(Ibf)); % corrente de limitada por
arco-MT
end
Ia % Imprimir a corrente Ia na tela
Msg2 = {'Entre com o valor de Ia [kA]:'...
        'Entre com o tempo de atuação do dispositivo [s]'};
Titulo = 'Cálculo de Energia Incidente';
NumLinhas = 1;
ValPreDef = {'0' '0'};
Dados2 = inputdlg (Msg2, Titulo, NumLinhas, ValPreDef);
Ia = str2num(cell2mat(Dados2(1,1)));
tr = str2num(cell2mat(Dados2(2,1)));
t = tr + tdj; % tempo total de duração do arco (relé + disjuntor)
% Cálculo da energia normalizada (En) em cal/cm2
En_aux = 10^(K1+K2+1.081*log10(Ia)+0.0011*G); % J/cm2;
En = En_aux / 4.184; % cal/cm2;
% En = energia incidente (J/cm2) normalizada para uma distância de
trabalho
% de 610mm e tempo de proteção de 200ms.
% K = -0,097 (configuração em "caixa" para todos os painéis
considerados
% neste estudo) ou K= -0,153 para configurações "abertas"
% K1 = -0,792 para configurações abertas (equipamentos ao ar livre) ou
-0,555 para configurações com equipamento dentro de cubículo ou
painel
% K2 = 0 para sistemas não aterrados ou aterrados através de alta
% resistência, ou -0,113 para sistemas aterrados.
% Ia = corrente de curto-circuito limitada por arco elétrico calculada na
% etapa anterior (kA)
% G = gap entre condutores (mm)
% Cálculo da energia incidente (E) em cal/cm2
E = 4.184*Cf*En*(t/0.2)*(610/D)^x; % cal/cm2;
D = (4.184*Cf*En*(t/0.2)*(610^x/Eb))^(1/x); % mm
% E = energia incidente (cal/cm2) para distância de trabalho e tempo de
% atuação da proteção especificados
% Cf = fator de cálculo igual a 1 para tensões acima de 1,0kV, ou 1,5
% para tensões abaixo de 1kV.
% En = energia incidente normalizada (cal/cm2) calculada anteriormente
% D = distância (mm) do ponto de arco elétrico até o operador,
conforme
% tabela 3 da IEEE 1584a.
% x = expoente de distância da tabela 4 da IEEE 1584a, igual a 1,641
% para sistemas com tensão entre 0,208 e 1kV (CCM's e painéis); ou
0,973
% para sistemas com tensão entre 5 e 15kV (painéis ou conjuntos de
manobra)
% t = duração do arco (s), soma dos tempos de atuação da proteção e de
% operação do disjuntor.
clc
E
Ia
D

```

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Lee, R., “The other electrical hazard: Electrical arc blast burns”, IEEE Trans. Ind. Applicat., vol. 1A-18, pp. 246–251, May/June 1982;
- [2] Fire Protection Research Foundation. “Occupational Injuries From Electrical Shock and Arc Flash Events”, Março de 2015;
- [3] <http://www.ishn.com/articles/96001-arc-flash-statistics> - Acessado em 20/11/2016;
- [4] NFPA 70E-2015 – “Standard for Electrical Safety Requirements for Employee Workplaces”, 2015;
- [5] OSHA - Occupational Safety and Health Administration – <https://www.osha.gov>;
- [6] American Burn Association, National Burn Repository®. National Burn Repository Report of Data From 2005-2014, Version 11.0, 2015;
- [7] Fundação COGE - <http://www.funcoge.org.br>;
- [8] ABRACOPEL - <http://abracopel.org/estatisticas>;
- [9] IEC-60909-0:2016 – “Short-Circuit Currents in Tree-Phase CA Systems”, 2016;
- [10] IEEE STD. 1584b-2011 – “IEEE Guide for Performing Arc-Flash Hazard Calculations”, 2002;
- [11] Neal, T., Bingham, A. H., and Doughty, R. L., “Protective clothing guidelines for electric arc exposure,” in Conf. Rec. IEEE PCIC, pp. 298–281, Sept. 1996;
- [12] Rocha, G., Zanirato, E., Ayello, F., Taninaga, R., “Arc-Flash Protection for Low- and Medium-Voltage Panels”, 58th Annual Petroleum and Chemical Industry Technical Conference, Toronto, Canada, September 19–21, 2011;
- [13] Lang, M., IEEE Member, and Jones, K., IEEE Member, “Exposed to the Arc Flash Hazard”, IEEE Transactions on industry applications, vol. 51, no. 1, Jan./Feb. 2015;

- [14] Doughty, R. L., Neal, T. E., and Floyd, H. L., “Predicting incident energy to better manage the electric arc hazard on 600-V power distribution systems,” IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 36, no. 1, pp. 257–269, Jan./Feb. 2000;
- [15] Ministério do Trabalho e Emprego - MTE. “Manual de orientação para especificação das vestimentas de proteção contra os efeitos térmicos do arco elétrico e do fogo repentino”, 2016;
- [16] Ministério do Trabalho e Emprego - MTE. Norma regulamentadora Nº 15 – Atividades e Operações Insalubres – Anexo Nº2 Limites de Tolerância para Ruídos de Impacto, 2014;
- [17] Drouet, M. G., Nadeau, F., “Pressures waves due to arcing faults in a Substation”, IEEE Transactions on Power Apparatus and System. V. PAS-98, 1979;
- [18] Doughty, R. L., Neal, T. E., Dear, T. A., and Bingham, A. H., “Testing update on protective clothing & equipment for electric arc exposure”, in Conf. Rec. IEEE PCIC, pp. 323–336, Sept. 1997;
- [19] Stoll, A. M., and Chianta, M. A., "Method and rating systems for evaluation of thermal protection", Bureau Aeros. Med., vol. 40, no. 11, pp. 1232-1238, Nov. 1969;
- [20] Lang, M., Neal, T., and Wilkins, R., “Introduction to arc flash”, ICEFA 2007, Blaise Pascal Academic Press, 2007;
- [21] Almeida, A. B. de, and Goecking, R. K., “Manual Técnico Sobre Vestimentas de Proteção ao Risco de Arco Elétrico e Fogo Repentino”, 2009;
- [22] Ammerman, R. F., Gammon, T., Sen, P.K., Nelson, J. P., “Comparative Study of Arc Modeling and Arc Flash Incident Energy Exposures”, 55° Petroleum and Chemical Industry Technical Conference, PCIC, 2008;
- [23] <http://workplacesafetysolutions.com/services/arc-flash-analysis/> - Acessado em 19/11/2016;
- [24] OHSAS 18001/2007 – “Occupational health and safety management systems – Requirements”, 2007;
- [25] Ministério do Trabalho e Emprego - MTE. “Norma regulamentadora Nº 6 – Equipamento de Proteção Individual – EPI”, 2015;

[26] Ministério do Trabalho e Emprego - MTE. Norma regulamentadora N° 10 - Segurança em Instalações e Serviços em Eletricidade, 2016;

[27] Vale, E. C. S. do, “Primeiro atendimento em queimaduras: a abordagem do dermatologista”, Trabalho realizado no Serviço de Dermatologia do Hospital das Clínicas da Universidade Federal de Minas Gerais e publicado em Anais Brasileiros de Dermatologia, vol. 80, nº1, Rio de Janeiro, Jan/Fev, 2005;

[28] Stoll, A. M., and Chianta, M. A., “Heat transfer through fabrics as related to thermal injury”, Transactions of the New York Academy of Sciences, pp. 649-670, 1971;

[29] <http://www.sf-electric.com/media/pdf/catalogues/11.pdf> - Acessado em 09/10/2016;

[30] JAS Consulting, “Global standards on arc rated personal protective equipment – Part 1”, 2015;

[31] ASTM F1959/F1959M-14 – “Standard Test Method for Determining the Arc Rating of Materials for Clothing”, 2014;

[32] Dupont, Apresentação: Arco Elétrico, 2016;

[33] <http://www.bbtv.com.br/camisa-dupont-protera-antichama-com-refletivo-pr-829342051.htm> - Acessado em 27/11/2016;

[34] Pereira Filho, C. S., Resende, F. B., Souza, M. M. de, “Análise dos Níveis de Energia Incidente nas Subestações Elétricas de uma Unidade Mineradora Estudo de Caso”. SSIA – Seminário Nacional de Sistemas Industriais e Automação, Belo horizonte, MG, 2015;

[35] NFPA – National Fire Protection Association - [www.nfpa.org](http://www.nfpa.org);

[36] Ministério do Trabalho e Emprego, Portaria N° 3.214, 08 de junho de 1978;

[37] Souza, J. J. B., e Pereira, J. G., “ Manual de auxílio na interpretação e aplicação da nova NR-10: NR-10 Comentada, São Paulo – Brasil, Outubro de 2005;

[38] Ministério do Trabalho e Emprego, Portaria N° 452, 20 de novembro de 2014;

- [39] Projeto ABNT NBR 16384, 2015.
- [40] Costa, P. F., “Segurança nos Retrofits de Painéis Elétricos – Palestra Técnica”, Vale Mina do Tamanduá, Nova Lima, 2015;
- [41] Rocha, G., Zanirato, E., Ayello, F., Taninaga, R., “Sistema De Proteção Contra Arco Voltaico em Painéis de Média e Baixa Tensão”. Schweitzer Engineering Laboratories, 2011;
- [42] Mardegan, C., “Proteção e Seletividade em Sistemas Elétricos”, Primeira Edição, Atitude Editorial LTDA, São Paulo, 400p, 2012;
- [43] Lima, P., e Coelho, A., “Recursos em Relés de Proteção para Garantir Segurança Humana na Média e Baixa Tensão”, Schweitzer Engineering Laboratories, 2016;
- [44] Queiroz, A. R. S., “Utilização de Relés Digitais para Mitigação dos riscos envolvendo arco elétrico”. Dissertação de Mestrado, Universidade de São Paulo, 2011;
- [45] Zeller, M., Amberg, A., e Haas, D., “Usando o SEL-751 e o SEL-751A para Detecção de Arco Voltaico”, Guia de Aplicação - Volume III, 2011;
- [46] Huening, W. C., “Time variation of industrial system short-circuit currents and induction motor contributions”, Trans. of the AIEE, Part II: Applications and Industry, vol.74, no.2, pp.90-101, 1955;
- [47] IEC 62271-100:2008 “High-Voltage Switchgear and Controlgear – Part 100: High-Voltage Alternating-Current Circuit-Breakers”, 2008;
- [48] IEEE STD. 242 (BUFF BOOK) – 2001, “IEEE Recommended Practice for Protection and Coordination of Industrial and Commercial Power Systems”, 2001;
- [49] ANSI / IEEE C57.013 – 1993, “IEEE Standard Requirements for Instrument Transformers”,
- [50] ABNT NBR-6856, “Transformadores de Corrente”, 2015;

[51] Sonza, R. E., Muraro, M. R., Cardoso Junior, G., Mariotto, L., “Aplicabilidade de Transformadores de Corrente de Baixa Relação de Transformação Acoplados a Relés de Sobrecorrente Digitais em Circuitos com Altas Correntes de Falta, Considerando o Efeito da Saturação”. CIDEL - *Congreso Internacional de Distribución Eléctrica*, Buenos Aires, Argentina, 2014;

[52] ABNT NBR-6855, “Transformadores de Potencial Indutivo”, 2009;