

**INSTITUTO ENSINAR BRASIL
FACULDADE DOCTUM DE JOÃO MONLEVADE**

**MARCUS STHEPHEN DE LIMA
TIAGO GOMES QUINTÃO**

**ESTUDO DE COORDENAÇÃO E SELETIVIDADE DE PROTEÇÃO PARA
REDUÇÃO DA INTENSIDADE DE ENERGIA INCIDENTE EM ACIONAMENTOS
ELÉTRICOS**

**JOÃO MONLEVADE
2019**

**INSTITUTO ENSINAR BRASIL
FACULDADE DOCTUM DE JOÃO MONLEVADE**

**MARCUS STHEPHEN DE LIMA
TIAGO GOMES QUINTÃO**

**ESTUDO DE COORDENAÇÃO E SELETIVIDADE DE PROTEÇÃO PARA
REDUÇÃO DA INTENSIDADE DE ENERGIA INCIDENTE EM ACIONAMENTOS
ELÉTRICOS**

**Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Curso de Engenharia
Elétrica da Faculdade Doctum de João
Monlevade, como parte dos requisitos
para obtenção do grau de Bacharel em
Engenharia Elétrica.**

**Orientador: Prof. Esp. Rinaldo Nonato e
silva**

**JOÃO MONLEVADE
2019**



FACULDADE DOCTUM DE JOÃO MONLEVADE
INSTITUTO ENSINAR BRASIL – REDE DOCTUM DE ENSINO

FOLHA DE APROVAÇÃO

O Trabalho de Conclusão de Curso intitulado: **ESTUDO DE COORDENAÇÃO E SELETIVIDADE DE PROTEÇÃO PARA REDUÇÃO DA INTENSIDADE DA ENERGIA INCIDENTE EM ACIONAMENTOS ELÉTRICOS** elaborado pelos acadêmicos TIAGO GOMES QUINTÃO e MARCUS STEPHEN DE LIMA, foi aprovado por todos os membros da Banca Examinadora e aceita pelo curso de Engenharia Elétrica do Instituto Ensinar Brasil de João Monlevade, como requisito parcial da obtenção do título de

Bacharel em Engenharia Elétrica

João Monlevade, 12 de Dezembro 2019.

Prof. Orientador: Esp. Rinaldo Nonato e Silva

Esp. Hernani de Oliveira Santiago

Esp. Júlio César Nunes da Silva

RESUMO

Sistemas elétricos industriais oferecem vários riscos para a segurança do trabalhador, entre eles, o de queimadura por energia incidente proveniente do arco elétrico, que é uma fonte de calor de alta intensidade. O fenômeno do arco elétrico pode causar danos à instalação industrial e aos trabalhadores que, ocasionalmente, possam entrar em contato com a energia incidente liberada no momento da explosão do arco. Alguns fatores influenciam essa energia e existem formas de reduzi-la e aumentar a segurança do trabalhador. Este projeto de graduação visa fazer um estudo do sistema elétrico de uma “retomadora do tipo tambor” localizada em uma planta mineradora em São Gonçalo do Rio Abaixo - MG, analisando os equipamentos de proteção, barramentos, transformadores, motores e os demais componentes calculando as correntes de curto-circuito para cada barramento, traduzindo essas correntes em correntes de arco para obter, em conjunto com informações sobre o tempo de atuação dos dispositivos de proteção, a energia incidente em cada ramal do sistema elétrico. Com a visão geral dos níveis de energia existentes no sistema, são feitas análises dos piores casos e são apresentadas proposições de soluções para redução dessas energias, através de alterações no sistema elétrico.

Palavras-chave: arco elétrico, energia incidente, proteção, sistemas industriais.

ABSTRACT

Industrial electrical systems pose a number of hazards to worker safety, including the burning of incident energy from the arc flash, which is a high-intensity heat source. The arc flash phenomenon can cause damage to the industrial installation as well as to workers who may occasionally come into contact with the incident energy released at the time of the arc explosion. Some factors influence this energy, and there are ways to reduce it and increase worker safety. This undergraduate project aims to make a study of the electrical system of a “drum recovery” located in a mining plant in São Gonçalo do Rio Abaixo - MG, analyzing the protective equipment, busbars, transformers, motors and other components by calculating the currents. short circuit for each bus, translating these currents into arc currents to obtain, together with information on the operating time of the protective devices, the energy incident on each branch of the electrical system. With the overview of the energy levels existing in the system, the worst case analyzes are made and propositions of solutions to reduce these energies are presented through changes in the electrical system.

Keywords: arc flash hazard, incident energy, protection, industrial systems.

LISTA E FIGURAS

Figura 1 - Corrente simétrica.....	8
Figura 2 - Corrente assimétrica	9
Figura 3 - Assimetria com componente contínuo	10
Figura 4 - Curto-circuito trifásico	11
Figura 5 - Curto-circuito bifásico.....	11
Figura 6 - Curto-circuito bifásico a terra	12
Figura 7 - Curto-circuito fase a terra.....	12
Figura 8 - Curto-circuito com contato simultâneo	13
Figura 9 - Regiões de risco para arco elétrico.....	17
Figura 10 - Lâmpada de plasma.....	19
Figura 11 - Arco elétrico nos polos do disjuntor durante a abertura.....	26
Figura 12 - Curva de abertura de disjuntores a óleo e vácuo.....	27
Figura 13 - Seleção de fusível para motor de 5CV.....	32
Figura 14 - Perdas elétricas em um motor	36
Figura 15 - Circuito elementar de um transformador.....	38
Figura 16 - Curvas de tempo x correntes	49
Figura 17 - Representando curto-circuito ramal da administração.....	51
Figura 18 - Diagrama seletividade amperimétrica	52
Figura 19 - Seletividade cronológica	53
Figura 20 - Unifilar e proteção via fio piloto, seletividade lógica.....	54
Figura 21 - Exemplo 1 de coordenograma	56
Figura 22 - Exemplo 2 Coordenogramas	57
Figura 23 - Recuperadora de tambor	59
Figura 24 - Placa o transformador a seco de 750 KVA	60
Figura 25 - Diagrama unifilar simplificado do projeto em estudo.....	61
Figura 26 - EPI contra arco elétrico classe quatro.....	62
Figura 27- Medidor de energia 435 da Fluk	66
Figura 28 - Tempo x corrente <i>Inrush</i> do transformador 750 kVA	66
Figura 29 - Ajuste dos parâmetros do RL-XXA-01-018	67
Figura 30 - Ajuste dos parâmetros do DJ-XXA-01-003	68
Figura 31 - Coordenograma de proteção da RT-XXA-9101	69

Figura 32 - Especificação da norma utilizada.....	71
Figura 33 - Resultado gerado pelo cálculo da energia incidente modelado no PTW	72
Figura 34 - Diagrama unifilar simplificado da retomadora de tambor	74
Figura 35 - Novo ajuste dos parâmetros do RL-XXA-01-018	75
Figura 36 - Resultado gerado pelo cálculo da energia incidente modelado no PTW após novo ajuste	76
Figura 37 - Coordenograma de proteção da RT-XXA-9101após novo ajuste proposto	77

LISTA E TABELAS

Tabela 1 - Categoria de vestimenta em função da energia incidente.....	20
Tabela 2 - Classe das luvas em função da tensão	21
Tabela 3 - Características elétricas dos cabos isolados.....	23
Tabela 4 - Referência para escolha de barras de cobre (adaptado)	29
Tabela 5 - Sequência de passos para estimativa da energia incidente e determinação dos EPIs adequados pelo método IEEE 1584b-2011 (Adaptado)	42
Tabela 6 - Tipo de equipamento e distância típica entre barramentos (Adaptado tabela 2 IEEE 1584b-2011)	45
Tabela 7 - Tipo de equipamento e distância de trabalho típica (Adaptado da tabela 3 IEEE 1584b-2011).....	45
Tabela 8 - Fatores para equipamento e classe de tensão (Adaptado).....	47
Tabela 9 - Tags dos equipamentos das subestações	63
Tabela 10 - Nível de tensão e classe dos equipamentos	63
Tabela 11 - Tipo do aterramento	64
Tabela 12 - Corrente de curto-circuito de cada equipamento	64
Tabela 13 - Descrição dos equipamentos instalados na RT-XXA-9101	65

ABREVIATURAS SIGLAS

ANEEL	- Agência Nacional de Energia Elétrica
CCM	- Centro de Comando de Motores
CF6	- Gás hexa fluoreto de enxofre seis
DB	- Decibéis
DJ	- Disjuntor
EPR	- Borracha etileno-propileno
EPI	- Equipamento de Proteção Individual
IEEE	- Institute of Electrical and Electronics Engineers - Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos
kV	- Kilovolt - Unidade de medida de tensão
kVA	- Kilovoltampere Unidade de medida de corrente elétrica
MC	- Centro de motores
TEM	- Ministério do Trabalho e emprego
NFPA	- National Fire Protection Association – Associação Nacional de Proteção contra Incêndios
NR	- Norma Regulamentadora
PTW	- Powe Tools for Windows
PVC	- Policloreto de vinila
RTC	- Relação de Transformação de Corrente
RTP	- Relação de Transformação de Potencial
SEP	- Sistema Elétrico de Potência
TCC	- Time Current Curve
TC	- Transformador de Corrente
TP	- Transformador de Potencial
XLPE	- Borracha polietileno reticulado

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	5
2 OBJETIVOS	6
2.1 Objetivo Geral	6
2.2 Objetivos Específicos	6
3 MARCO TEÓRICO	7
3.1 Curto-circuito	7
3.1.1 Corrente Simétrica e Corrente Assimétrica	8
3.1.2 Corrente Simétrica.....	8
3.1.3 Corrente assimétrica.....	9
3.1.4 Curto-circuito trifásico	10
3.1.5 Curto-circuito bifásico	11
3.1.6 Curto-circuito fase-terra	12
3.2 Arco Elétrico	13
3.2.1 Temperatura do arco elétrico.....	14
3.2.2 Pressão do arco elétrico	15
3.2.3 Velocidade do arco elétrico.....	16
3.2.4 Energia do arco elétrico.....	16
3.2.5 Som do arco elétrico	16
3.2.6 Distâncias do arco elétrico.....	17
3.2.7 Danos x tempo de extinção do arco.....	18
3.2.8 Arco e plasma.....	18
3.2.9 Vestimentas para proteção contra arco	19
3.3 Dimensionamento Dos Equipamentos	21
3.3.1 Cabos	21

3.3.2 Disjuntores.....	25
3.3.3 Painéis.....	27
3.3.4 Fusíveis	31
3.3.5 Transformadores de Correntes TC's	32
3.3.6 Transformadores de Potencial TP's.....	34
3.3.7 Motores de Indução	35
3.3.8 Transformadores	37
3.4 Metodologia para calcular energia incidente	39
3.5 Relé de proteção	48
3.5.1 Curvas dos relés.....	49
3.5.2 Seletividade de operação	50
3.5.3 Seletividade amperimétrica	51
3.5.4 Seletividade Cronométrica.....	52
3.5.5 Seletividade lógica.....	53
3.5.6 Perda de seletividade	54
3.6 Coordenograma	55
4 METODOLOGIA	58
5 ESTUDO DE CASO	59
5.1 Levantamento de dados.....	62
5.2 Estudo de coordenação e seletividade.....	67
5.3 Cálculo da energia incidente de arco elétrico.....	70
5.4 Análise dos resultados e propostas de mitigação do risco de arco elétrico	
72	
5.4.1 DJ-XXA-01-003 de alimentação da barra 480V do MC2-XXA-9101	74
6 CONCLUSÃO	79
6.1 Trabalhos futuros	79
REFERÊNCIAS.....	80

1 INTRODUÇÃO

Uma das maiores preocupações do setor elétrico do Brasil e no mundo são os grandes números de lesões e mortes causadas por manipulação da energia elétrica. Pois trabalhadores, que atuam diretamente no setor elétrico, estão expostos a vários riscos, principalmente, o de queimadura devido à energia incidente gerada por arco elétrico, sendo essa uma fonte de calor de alta intensidade. Pesquisas indicam que 80% das lesões dos trabalhadores do setor elétrico são de queimaduras externas causadas por energia incidente de arco elétrico e não por choque elétrico

Segundo LEE (1982), “o arco elétrico pode atingir quatro vezes a temperatura da superfície solar”. A energia incidente liberada no momento de uma explosão causada por arco elétrico pode causar graves danos tanto aos trabalhadores quanto às instalações, por isso, é de extrema importância os estudos para a sua redução.

Através de cálculos é possível saber a quantidade de energia incidente liberada por um barramento elétrico no momento de uma falta. E essa energia possui relação com algumas características da instalação, como, por exemplo, o tempo de atuação dos dispositivos de proteção bem como o valor da corrente de curto-circuito.

Nos dias atuais, existem várias tecnologias disponíveis para reduzir o risco de arco voltaico, entre elas estão o interruptor de manutenção de arco (ARM), painéis mais resistentes, relé com detecção óptica de luz para evento de arco, gabinete de controle remoto do disjuntor com *racking* remoto, dentre outras. Porém realizar a implementação dessas tecnologias pode onerar significativamente os custos da empresa. Outra opção existente para reduzir a energia incidente em acionamentos elétricos é trabalhar na alteração de ajustes dos parâmetros de configuração do relé e do disjuntor.

O trabalho a seguir apresenta propostas de modificações nos parâmetros de ajuste das proteções de uma recuperadora de minério de ferro do tipo tambor, em uma planta mineradora localizada em São Gonçalo do Rio abaixo - MG, com o objetivo de minimizar a energia incidente através do estudo de coordenação e seletividade, impactando diretamente na segurança do trabalhador e, conseqüentemente, minimizando os danos nos equipamentos em caso da existência do arco elétrico.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Realizar um estudo de coordenação e seletividade de proteção em uma retomadora de minério de ferro do tipo tambor, através de um estudo de caso, para identificar um método para a redução da intensidade de energia incidente de arco elétrico em seus acionamentos.

2.2 Objetivos Específicos

1. Realizar estudo bibliográfico sobre tema, analisar e gerar procedimentos para minimização de energia incidente em um acionamento elétrico de potência através de alterações no estudo de seletividade e coordenação do “equipamento” em uma planta de beneficiamento de minério.
2. Expor ou indicar requisitos mínimos para o desenvolvimento de um projeto de proteção de um sistema elétrico de potência, considerando as normas técnicas aplicáveis;
3. Realizar análise do estudo de caso: projeto de proteção de um sistema elétrico de potência de um equipamento, através de identificação do nível de energia incidente em seus acionamentos;
4. Efetuar cálculos da energia incidente, considerando os novos parâmetros de ajuste da proteção do equipamento em estudo;
5. Propor alterações nos parâmetros de ajuste da proteção, com base nos resultados alcançados nos cálculos realizados, com o objetivo de indicar um método para minimizar a energia incidente em um acionamento elétrico em estudo.

3 MARCO TEÓRICO

A compreensão dos conteúdos apresentados neste trabalho é indispensável, pois envolvem conceitos e teorias importantes para o desenvolvimento do projeto.

3.1 Curto-circuito

Normalmente, o curto circuito é acometido pela redução da impedância do circuito onde acontece o contato direto ou por meio de arco elétrico, entre os condutores de fase ou entre os condutores de fase-terra, causando danos no ponto de surgimento e ao circuito onde ela passa, provocando altas temperaturas.

Segundo Filho (2018 p.201), “os valores de pico estão, normalmente, compreendidos entre 10 e 100 vezes a corrente nominal no ponto de defeito da instalação e dependem da localização deste”.

Filho (2018 p.201), ainda explica que, existem duas formas de descrever os curtos circuitos podendo ser “do tipo franco, quando o condutor de fase faz contato direto com uma massa metálica aterrada, ou do tipo a arco, quando a corrente da fase circula através de um arco elétrico (condutor gasoso) para qualquer uma das fases ou para a terra”.

Para especificar os parâmetros de proteção e as melhores técnicas visando rapidez e confiabilidade, faz-se necessário saber as correntes de curto circuito e seus efeitos térmicos, determinando de maneira assertiva o tempo que os dispositivos poderão estar expostos a estas correntes.

Filho (2018 p.201) informa que, para escolher os dispositivos deve-se determinar as “correntes de curto-circuito nas instalações elétricas de baixa e alta tensão nos sistemas industriais, sendo isto, fundamental para a elaboração do projeto de ajuste das proteções e coordenação dos seus diversos elementos”.

Portanto, um dispositivo de proteção deve ser fabricado para interromper a corrente de curto-circuito nos condutores, minimizando os efeitos térmicos e mecânicos dessa corrente diminuindo a exposição de trabalhadores e componentes.

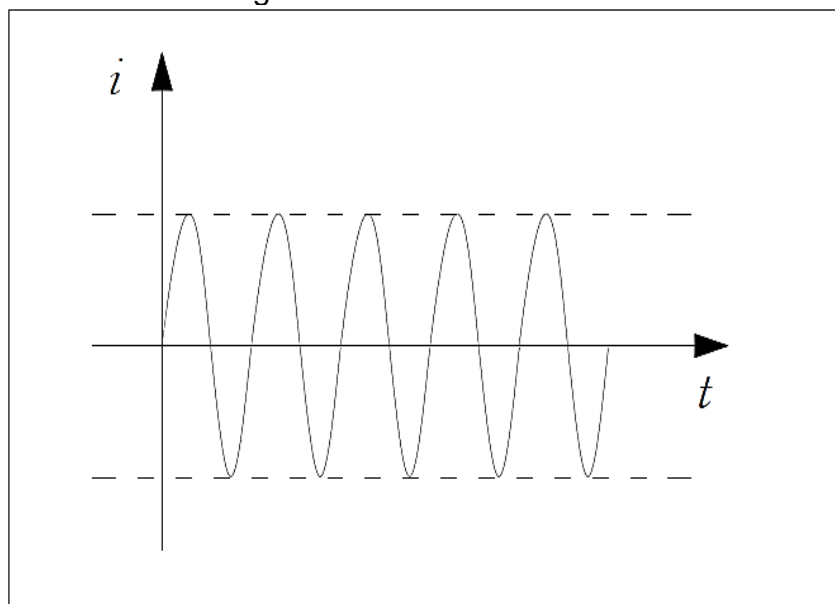
3.1.1 Corrente Simétrica e Corrente Assimétrica

Os valores assimétricos da corrente de curto-circuito são empregados para a determinação da capacidade dos equipamentos em suportar os efeitos dinâmicos das correntes de falta. Já os valores simétricos são usados para determinar as capacidades de intervenção dos dispositivos de seccionamento (exemplo, disjuntores) as capacidades de suportar os efeitos térmicos produzidos pelas correntes de falta e para definir os ajustes dos dispositivos de proteção contra sobrecorrente.

3.1.2 Corrente Simétrica

A simetria da corrente pode ser escrita como sendo uma imagem e seu reflexo no espelho, ou seja, o que estiver no lado positivo do eixo deve ser refletido no lado negativo, do ponto de vista de amplitude, formato da onda quanto à frequência e repetições. A corrente elétrica pode ser representada por uma equação senoidal, quase sempre perfeita, o que proporciona uma simetria no seu valor de pico e lisura de sua representação conforme figura 1. Creder (2016 p.330) define que a simétrica da corrente “pode ser avaliada pela equidistância da envolvente dos picos em relação ao eixo dos tempos”.

Figura 1 - Corrente simétrica

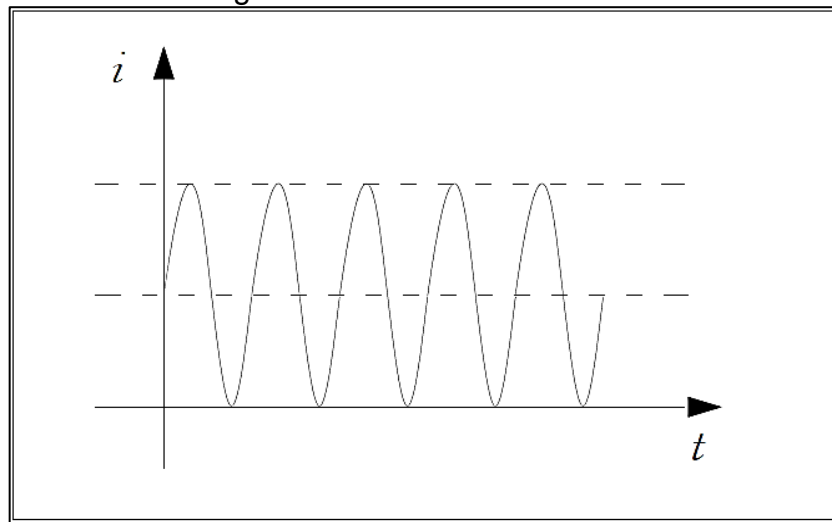


Fonte: Creder (2016 p.330)

3.1.3 Corrente assimétrica

Assimetria da corrente pode ser descrita como sendo um deslocamento no seu eixo horizontal, podendo ser totalmente deslocado, como visto figura 2, onde pode ser observado que a corrente está deslocada para cima no eixo do tempo, gráfico de corrente medido no tempo. Também pode ser parcialmente deslocado.

Figura 2 - Corrente assimétrica



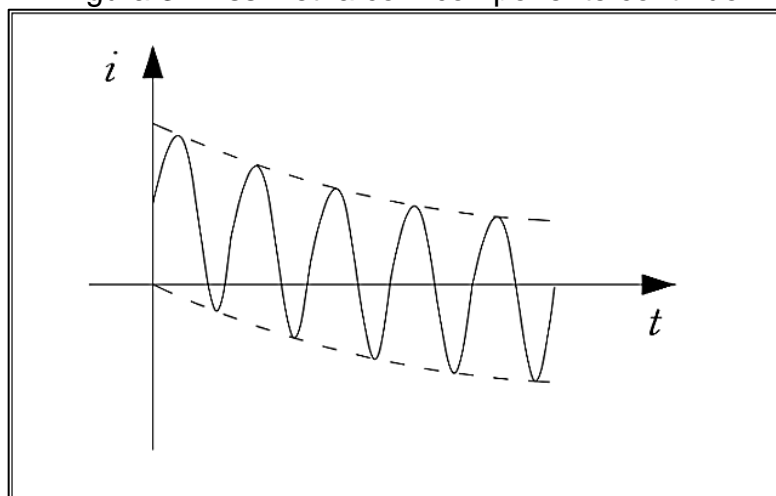
Fonte: Creder (2016 p.330)

De acordo com Creder (2016 p.330), “normalmente uma corrente de curto-circuito inicia-se com máxima assimetria tornando-se, gradualmente, simétrica”.

Assimetria pode ser devido a um componente contínuo como mostrado na figura 3. O decaimento do componente contínuo é devido à relação entre reatância e a resistência, X/R do circuito, que o consome ao longo do tempo sobrando apenas a componente senoidal simétrica.

Creder (2016 p.331) descreve que “a componente de CC decresce de valor proporcional à relação X/R entre a reatância e a resistência do circuito”.

Figura 3 - Assimetria com componente contínuo



Fonte: Creder (2016 p.331)

De acordo com SANTOS (2009), “um curto-circuito pode ser definido como uma conexão intencional ou acidental, em geral de baixa impedância, entre dois ou mais pontos que normalmente estão em diferentes potenciais elétricos.”, ou seja, dependendo do tipo de curto-circuito essa corrente resulta em valores de corrente elétrica muito alta.

Conforme Mardegan (2012), os tipos de curto-circuito mais comuns são:

- Curto-circuito Trifásico;
- Curto-circuito bifásico;
- Curto-circuito bifásico a terra;
- Curto-circuito fase-terra;
- Curto-circuito a terra por arco elétrico;

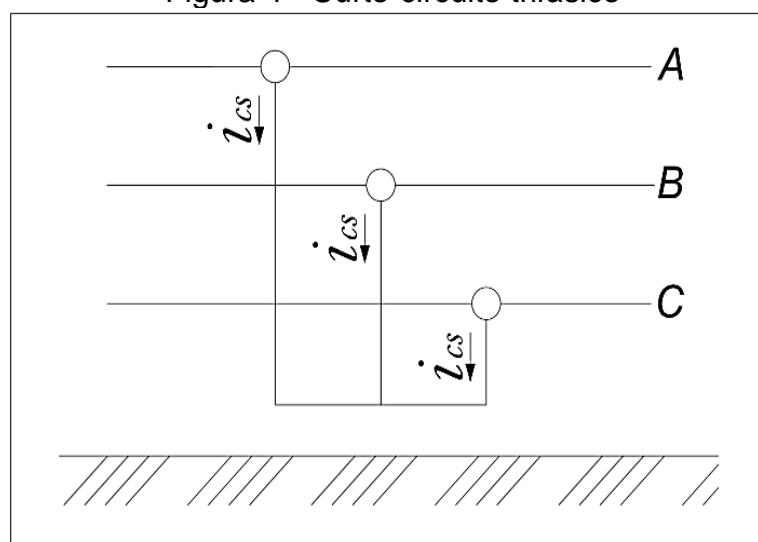
Dando continuidade a este estudo, serão abordadas as características de cada curto-circuito exemplificando-as através de desenhos, discriminando cada fase e terra. Pois para calcular a magnitude da corrente de falta e especificar de maneira adequada o sistema de proteção depende de vários fatores, dentre eles o tipo de curto-circuito.

3.1.4 Curto-circuito trifásico

O curto-circuito trifásico acontece quando há um contato entre as suas três fases conforme figura 4. Pode ser ainda entre as três fases para a terra, que será trifásico à terra, sendo normalmente o de maior intensidade.

No curto-circuito trifásico as tensões das fases tenderão a valores nulos como descreve Filho (2018 p.209), “um curto-circuito trifásico se caracteriza quando as tensões nas três fases se anulam no ponto de defeito”, e será considerada uma conexão ideal onde as impedâncias são consideradas zero nos pontos de contato.

Figura 4 - Curto-circuito trifásico

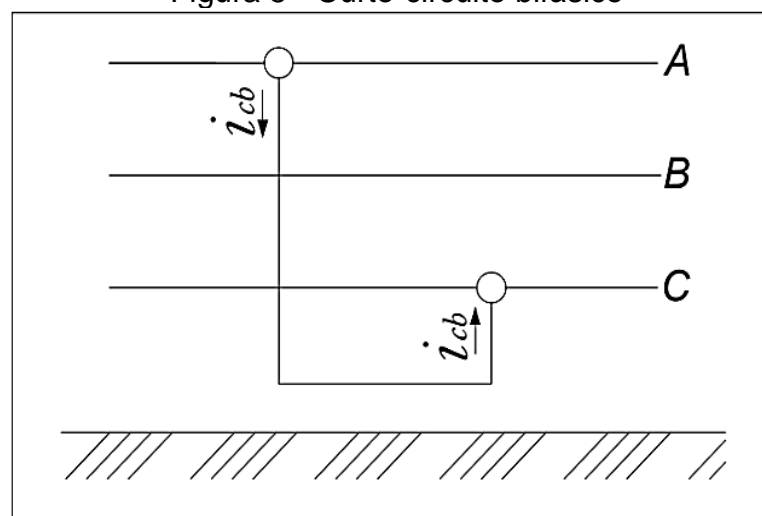


Fonte: Filho (2018 p.209)

3.1.5 Curto-circuito bifásico

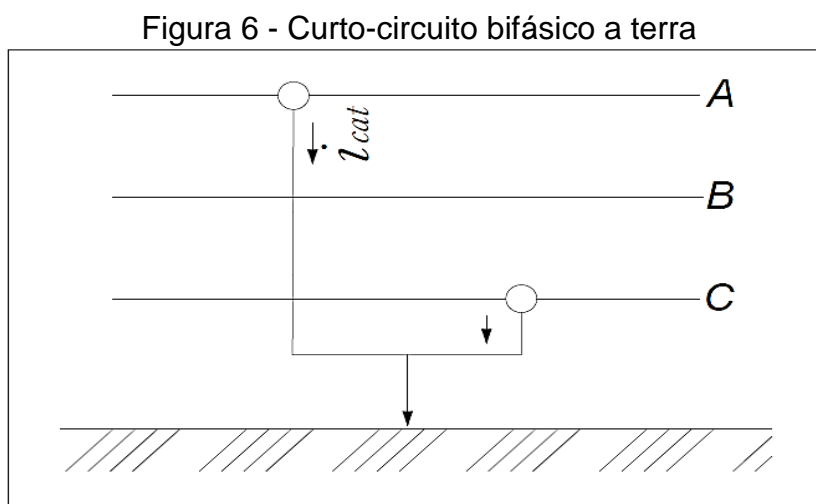
O curto circuito bifásico se caracteriza pelo contato entre duas de suas fases, podendo ser qualquer destas, a figura 5 mostra o contato entre as fases A e C.

Figura 5 - Curto-circuito bifásico



Fonte: Filho (2018 p.209)

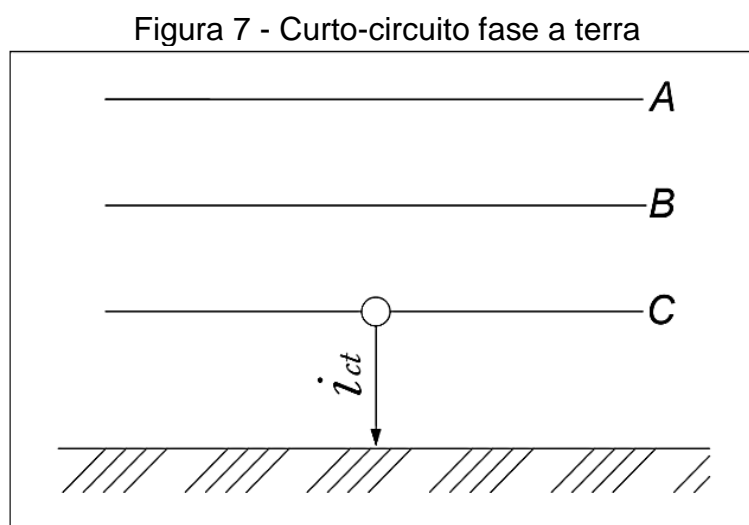
Segundo Filho (2018 p.209), “o defeito pode ocorrer em duas situações distintas, ou seja: na primeira, há o contato somente entre dois condutores de fases diferentes”, e o segundo caso em que haverá a participação do condutor de terra, “além do contato direto entre os citados condutores, há a participação do elemento terra”, conforme a figura 6, denominando-se de curto circuito bifásico à terra.



Fonte: Filho (2018 p.209)

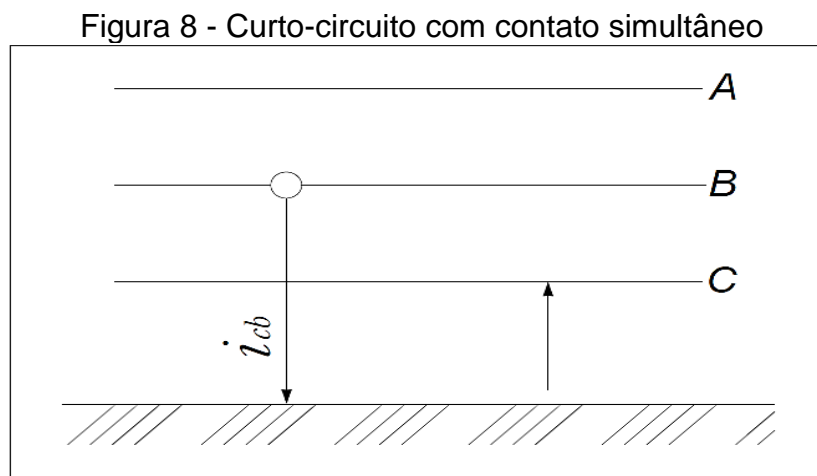
3.1.6 Curto-circuito fase-terra

De acordo com Filho (2018 p.209), “o defeito monopolar pode ocorrer em duas situações diversas: na primeira, há somente o contato entre o condutor fase e terra”, este fato está representado pela figura 7.



Fonte Filho (2018 p.209)

Já o segundo caso se parece com o curto-circuito bifásico, Filho (2018 p.209) descreve que ele existe quando “há o contato simultâneo entre dois condutores fase e terra”, sendo representado na figura 8, assemelhando-se ao curto bifásico representado na figura 5.



Fonte: Filho (2018 p.209)

3.2 Arco Elétrico

Mamede (2015 p.325) explica que, “o arco elétrico é um fenômeno que ocorre quando se separam dois terminais de um circuito que conduz em determinada corrente de carga, sobrecarga ou de defeito”, surgindo durante a abertura e fechamento de disjuntores, chaves, interruptores, entre outros dispositivos de manobras.

De acordo com KHAN (2018), o arco elétrico é uma das principais causas de ferimentos e mortes em acidentes relacionados a trabalho elétrico. Pois a exposição ao risco de energia incidente de arco elétrico é um risco inerente para os profissionais que realizam atividades de manutenção e operação em instalações elétricas.

Segundo dados levantados pela ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica) em 2018, o número de mortes decorrentes de acidentes envolvendo energia elétrica, com trabalhadores diretos e indiretos e com terceiros, chegou a 207. O número foi 31% superior ao registrado pelo órgão em 2017.

Diversas falhas podem desencadear um arco elétrico como: falha de isolamento, mau contato, umidade, contaminação por pó, sal, imprudência de

operadores, imperícia nas instalações, fatores naturais com os raios, ou seja, tudo que provoca ionização do meio isolante proporcionado o surgimento de correntes de curto-circuito.

Assim, a exposição a arco elétrico, conforme nível de energia incidente, poderá provocar queimaduras graves (até fatais) nos profissionais que executam atividades em instalações elétricas energizadas.

O conhecimento, da Norma regulamentadora 10 (NR10), torna-se necessário para a redução de acidentes na área elétrica, capacitar os funcionários que trabalham tanto no Sistema elétrico de potência (SEP complementar), quanto os que trabalham com instalações residenciais, prediais e telefonia.

Conforme estabelece o objetivo desta NR10(2016 pg.01):

A NR10 estabelece os requisitos e condições mínimas objetivando a implementação de medidas de controle e sistemas preventivos, de forma a garantir a segurança e a saúde dos trabalhadores que, direta ou indiretamente, interajam em instalações elétricas e serviços com eletricidade.

3.2.1 Temperatura do arco elétrico

O arco elétrico gera altas temperaturas, na ordem de 20.000°C o que seria suficiente para fundir qualquer material conhecido na superfície da terra. O cobre, por exemplo, onde a uma temperatura de 1.083°C, já o metal com o maior ponto de fusão da tabela periódica é o Tungstênio que funde a uma temperatura de 3.550°C.

As altas temperaturas geradas durante um arco elétrico são registradas pela NFPA 70E (2015, p.90) “os arcos eletroeletrônicos produzem as temperaturas mais altas na Terra aproximadamente 20.000° C”. Para Madergan (2012 p.77) “no início e no fim do arco, a temperatura chega a 4500°C”, o que demonstra ser devastador bem no início do arco.

Pessoas expostas a temperaturas extremas como as encontradas no arco elétrico, sofreram queimaduras diretas na pele, e também provenientes da ignição de roupas, segundo a NFPA 70E (2015 p.90) “a maioria das entradas em hospitais devido a acidentes elétricos são de queimaduras de arco elétrico, mais de 2000 pessoas são atendidas com graves queimaduras por arco elétrico”.

3.2.2 Pressão do arco elétrico

Altas pressões serão formadas pela expansão do ar e gases formados com o arco elétrico, a NFPA 70E (2015, p.) relata que “esta onda de pressão jogará trabalhadores através das salas, derrubando-os com uma pressão no prédio que pode ser superior 9000kg/m²”.

De acordo com a NFPA 70E (2015, p.90) “o cobre se expande por um fator de 67.000 vezes quando se transforma de sólido em vapor” resultando em uma onda de pressão que projetará material, destruindo portas e até colunas inteiras pela ação do arco elétrico. As pessoas podem ser atingidas a distâncias de 3 metros do arco.

Conforme Madergan (2012 p.78), esta “pressão do arco pode ser calculada como segue com a equação 1.

$$P = \frac{2 * N * U * I * t * 10^5}{V} \quad (1)$$

Em que:

P = Pressão do arco (Pa);

N = Número de arcos;

U = Tensão de arco;

I = Corrente de arco (kA);

t = Tempo de arco (s);

V = Volume do compartimento em m³.

Madergan (2012 p.78) ainda relata, que “com o aquecimento da isolação e dos materiais instalados no local do arco, ocorre o desprendimento de vapores e gases prejudiciais à saúde que podem causar o envenenamento e levar, inclusive, à morte”.

3.2.3 Velocidade do arco elétrico

NFPA 70E (2015 p.157) “o material e o metal fundido são expelidos do arco a velocidades superior a 1120 km/h, rápido o suficiente para que os estilhaços penetrem completamente no corpo humano”.

3.2.4 Energia do arco elétrico

A energia do arco está diretamente ligada à intensidade da corrente e a sua duração (tempo). Para Madergan (2012 p.79) “tanto a corrente como o tempo são importantes”.

Madergan (2012 p.79) demonstra o uso da metodologia IEEE 1584 (Institute of Electrical and Electronics Engineers), que ressalta a dificuldade de modelar o arco elétrico, “o processo de obtenção dos níveis de energia incidente é obtido através de ensaios com diversos tipos de equipamentos” ressalta também a variedade, os tipos de equipamentos; foram escolhidos dois valores padrão para os ensaios:

- Tempo de atuação - 0,2 segundos.
- Distância do operador em relação ao arco elétrico - 610mm.

Madergan (2012 p.80) diz que “com estes dois valores, calcula-se a chamada (energia incidente normalizada), baseada em ensaio e efetuando-se a obtenção da curva de tendência”.

3.2.5 Som do arco elétrico

O som proveniente de um arco elétrico pode causar perda auditiva por explosão de som, segundo a NFPA 70E (2015, p.90) “o som pode ter uma magnitude de 160dB a uma distância de aproximadamente 60cm do arco”. A NBR10152 atribui o limite de 115 db como máximo suportável pelo corpo humano, e define como limite de surdez o valor de 125db.

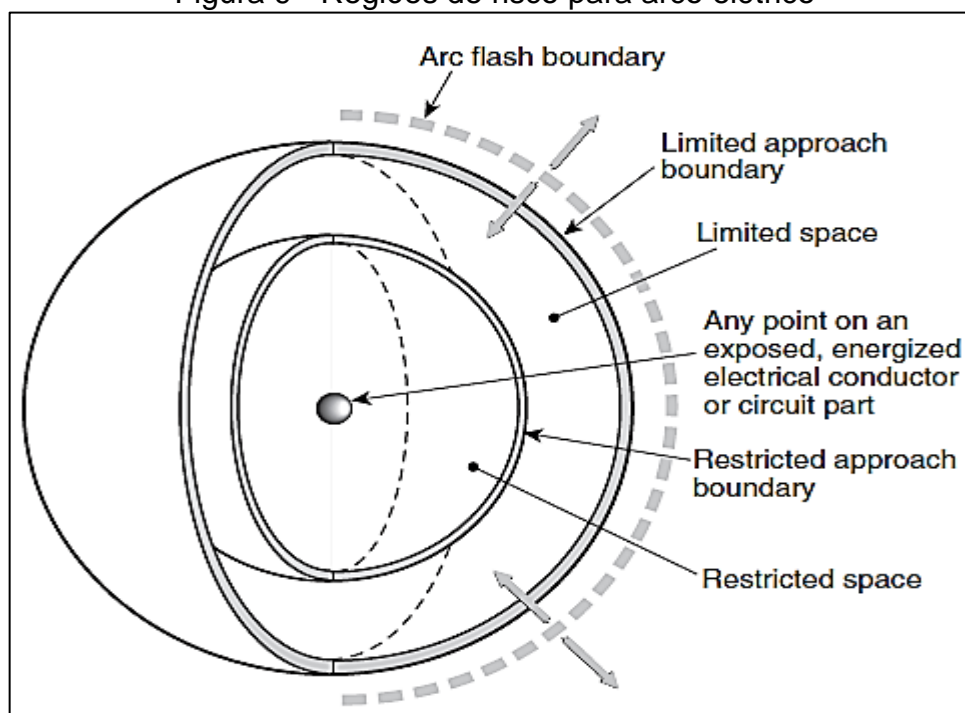
3.2.6 Distâncias do arco elétrico

A distância de risco toma como ponto de referência zero o ponto energizado exposto, local de risco de choque elétrico ao contato ou arco na aproximação, definindo então as distâncias para trabalhos e os limites de aproximação.

A figura 9 mostra os limites do arco e o ponto energizado, a norma NFPA 70E (2015 p.69) diz “determine o limite do arco voltaico e, se o limite tiver que ser cruzado, deve ser utilizado equipamento de proteção apropriado com classificação de arco”.

A norma ainda orienta que os trabalhadores devem ser qualificados para exercerem trabalhos nas proximidades, e para atividades que adentre o espaço restrito, deve usar roupas adequadas ao nível de energia incidente, receber autorização e se precaver de contatos acidentais, conforme descreve a NFPA 70E (2015 p.61) “minimizar a probabilidade de contato corporal com condutores energizados e partes do circuito por motivo de movimento inadvertidos, mantendo tanto do corpo fora do espaço restrito, como as ferramentas em uso, que devam ser protegidas...”.

Figura 9 - Regiões de risco para arco elétrico



Fonte: NFPA 70E (2015 p.61)

Em que:

1. Limite de arco de flash (Arc flash boundary): este primeiro ponto está referindo a uma zona livre;
2. Limite de aproximação limitada (Limited approach boundary);
3. Espaço limitado (Limited space);
4. Limite de aproximação restrito (Restricted approach boundary);
5. Espaço restrito (Restricted space);
6. Qualquer ponto em um condutor elétrico ou parte do circuito energizado exposto (Any point on an exposed, energized electrical conductor or circuit part).

3.2.7 Danos x tempo de extinção do arco

Madergan (2012 p.77) “Arcos numa mesma fase (terminais mal encaixados de disjuntores e gavetas extraíveis) não são identificados como falta para os relés de sobrecorrente. Para a proteção, é necessária utilização relé fotossensível”.

Pode-se ainda relatar que o arco que se origina deste mau contato dos terminais de gavetas e disjuntores nem sempre passa pelos TC's das fases, pois, quando ioniza o ar para outras fases a corrente de curto circuito volta para a fonte, sendo assim, o relé deste compartimento não será informado da alta corrente sendo então de responsabilidade do relé a montante perceber e eliminar a falta, que poderá atingir potencial máximo de curto circuito do barramento ou Centro de Comando de Motores.

3.2.8 Arco e plasma

Existem quatro estados da matéria: que são solido, liquido, gasoso e o plasma. A ciência da química determina, que para que haja mudança de estado das matérias é necessário aquecê-las ou resfriá-las. Assim quando aquecidas, as moléculas ficam distantes e agitadas o que pode gerar liberação de energia, que indica o quarto estado da matéria, o mais energizado de todos. Esta teoria é confirmada por Mamede (2015 p.339, “o plasma de vapor metálico tem uma elevada condutibilidade. Daí resulta uma tensão de arco extremamente pequena com um valor compreendido entre 20 e 200 V.”

A alta temperatura rompe as camadas de valência dos gases, liberando átomos, que perderam e ganharam elétrons, gerando íons. O plasma é formado por conjunto quente e denso de átomos livres, elétrons e íons, em uma distribuição quase neutra.

A figura 10 representa uma lâmpada de plasma, usada como decoração.

Figura 10 - Lâmpada de plasma



Fonte: Fogaça (Brasil Escola)

3.2.9 Vestimentas para proteção contra arco

No Brasil, a norma que trata dos assuntos de proteção dos trabalhadores que estão expostos aos efeitos do arco elétrico é a NR-10 – Norma Regulamentadora do ministério de trabalho. Segundo Junior (2016 p.41), “o novo texto da NR-10 enfatiza que, além do risco de choque elétrico, o trabalhador está exposto ao risco de arco elétrico e, por causa disso, existe a obrigatoriedade de utilizar equipamento de proteção individual”. O que vem motivando empresas a pesquisar e desenvolver tecidos retardantes a chamas, quer dizer tecidos que a determinadas calorias não propagarão as chamas.

As roupas podem ser constituídas de diversas camadas de tecidos, de fibras naturais como o algodão, para se atingir um valor de proteção, pode-se sobrepor camadas de roupas para isto, desde que os teste que o aprobe tenha sido feito

desta maneira, a NFPA 70E (2015 p.92) descreve da seguinte maneira esta técnica, “um traje de arco elétrico com uma classificação de arco de 25 cal/cm² poderia ser usado sobre uma camisa com arco e calças com classificação de arco de 8 cal/cm² para atingir uma taxa de arco total do sistema de 40 cal/cm²”. A recomendação é que o traje seja confortável permitindo aos trabalhadores os exercícios de suas atividades.

Não se deve usar roupas de tecidos inflamáveis entre as camadas de tecidos retardantes a chama, pois em um eventual rompimento das camadas adjacentes, ela entraria em combustão o que proporcionará queimaduras severas ao trabalhador, pois:

[...] se a exposição do arco voltaico for suficiente para abrir toda a camada externa ou subcamada de roupas, a camada de fibra pode entrar em ignição e causar queimaduras mais graves em uma área expandida do corpo. Isso se deve às camadas inferiores de fibra queimando em áreas do corpo do trabalhador que não foram expostas pelo evento de arco elétrico. Isso pode ocorrer quando a camada subjacente de fibras continua a queimar sob camadas de roupas com classificação de arco, mesmo em áreas nas quais as camadas ou camadas de roupas com arco não são abertas devido a um (efeito de chaminé). (NFPA 70E, 2015, p.92).

Sabendo os valores de energia incidente, definem-se as vestimentas adequadas. A tabela 1 refere às categorias e à energia (calorias ou joules) por centímetro quadrado, em que a relação de uma caloria representa 4,184 Joules pelo sistema internacional de unidades.

Tabela 1 - Categoria de vestimenta em função da energia incidente
Equivalência entre as diferentes unidades

Categoria	Cal/cm ²	J/cm ²
0	<1,195	<5
1	4	16,74
2	8	33,47
3	25	104,6
4	40	167,36

Fonte: Madergan (2012 p.80)

Proteção para as mãos se faz necessária com os mesmos critérios para escolhas dos tecidos, vale ressaltar o que orienta a NFPA 70E (2015 p.65) “se forem

usadas luvas isolantes de borracha com protetores de couro, não são necessárias luvas de couro adicionais ou de arco elétrico”.

A tabela 2 mostra a classificação das luvas em função da tensão e os valores de tensão para os testes de integridade, estes testes são feitos anualmente e devem-se descartar as luvas que não passarem nos testes, bem como as outras ferramentas de proteção individuais ou coletivas.

Tabela 2 - Classe das luvas em função da tensão

Classificação da Luva	Maxima Tensão de Trabalho (V)	Maxima Tensão de Teste (kV)
Classe 00	500	2,5
Classe 0	1000	5
Classe 1	7500	10
Classe 2	17000	20
Classe 3	26500	30
Classe 4	36000	40

Fonte: Madergan (2012 p.82)

3.3 Dimensionamento Dos Equipamentos

O dimensionamento dos equipamentos se faz necessário para assegurar o perfeito funcionamento do sistema elétrico e também seguro as pessoas, não ter perdas adicionais, ter custo adequado na implantação, manutenção.

3.3.1 Cabos

Os cabos têm a finalidade de conduzir energia elétrica e são construídos de alumínio ou de cobre, com uma camada de isolante, semi-isolados ou nu. São usados para transmitir energia nos diversos níveis de tensão, construídos com um único condutor (unipolar), dois condutores (bipolares), três condutores (tripolar) e outros múltiplos condutores de força e de controle para atender diversas aplicações na transmissão de energia casas, indústrias entre muitas aplicações.

“os condutores de alumínio normalmente dominam o mercado nas aplicações de redes e linhas aéreas de distribuição e transmissão de energia elétrica não localizada nas proximidades da orla marítima. Seu baixo custo, quando comparado ao dos condutores de cobre, a sua relação peso por área e seu excelente comportamento aos esforços mecânicos, quando encordoado com a alma de aço, os credenciam, com inúmeras vantagens, para larga utilização pelas concessionárias de energia elétrica de praticamente todos os países” Filho (2015 p.94).

Já os cabos de cobre abrangem praticamente todos os setores, possui cor avermelhada e é encontrado na natureza misturado a outros minerais, Filho (2015 p.94) afirma que, “o cobre utilizado nos condutores elétricos deve ser purificado através do processo de eletrólise, o que lhe dá o nome de cobre eletrolítico, conseguindo-se, dessa forma, um grau de pureza de 99,99%”.

Para escolhermos um cabo deve-se levar em consideração a corrente que o mesmo conduzirá, o método de instalação, a temperatura de trabalho e ambiente, o tipo de isolamento, entre outras características que são empregadas aos cabos na sua construção, montagem, e regime de operação.

Os cabos são revestidos de diferentes materiais isolantes, que proporcionam a instalação de fases diferentes dentro de um mesmo eletroduto, ou bandejamento. Filho (2015 p.95) explica que, “as isolações termoplásticas são fabricadas à base de cloreto de polivinila, conhecido comumente como PVC. Têm a propriedade de se tornar gradativamente amolecidas a partir da temperatura de 120°C, passando ao estado pastoso com o aumento”.

Para aplicação de redes aéreas tem sido usado os cabos semi-isolados WPP, que Filho (2015 p.97) descreve da seguinte forma, “cabo WPP são fabricados com fios de cobre eletrolítico ou alumínio nu com encordoamento classe 2, com capa de proteção em cloreto de polivinila (PVC)”.

Os cabos elétricos também recebem uma camada de cobre enrolada, sobre o material isolante primário, que o reveste em toda a sua extensão formando uma blindagem. Filho (2015 p.91) afirma que a sua “função principal é confinar o campo elétrico aos limites da isolação e ao mesmo tempo eliminar a possibilidade de choque elétrico ao se tocar na capa do cabo desde que a blindagem metálica esteja corretamente aterrada”. Ainda sobre esta blindagem se coloca uma camada de revestimento isolante externa.

A tabela 3 traz algumas das características dos cabos isolados, tendo como destaque a máxima temperatura que os cabos suportam durante um curto circuito, 250°C, temperatura que serão superadas em centenas de vezes.

Com base na classe de tensão dos cabos, Filho (2015 p.109) diz que “as tensões de isolamento dos cabos são padronizadas em 0,6/1 – 1,8/3 – 3,6/6 – 6/10 – 8,7/15 – 12/20 – 15/25 – 20/35 kV, sendo o primeiro valor a tensão entre fase e terra e o segundo valor, a tensão entre fases”.

Tabela 3 - Características elétricas dos cabos isolados

Características normais		PVC	PE	XLPE	EPR	Papel impregna do com massa	Papel impregnado com óleo
Rigidez dielétrica	CA	15	50	50	40	30	50
	Impulso	40,0	65,0	65,0	60	75,0	120,0
Fator de perda tg(10x10 ⁻⁴)		70,0	0,5	0,5	3,0	8,0	3,0
Resistividade térmica (k.m/w)		5,0	3,5	3,5	5,0	-	-
Estabilidade em água		Má	Má	Regular	ótima	-	-
	Permanente	70,0	75,0	90,0	90,0	-	-
Limites térmicos (°c)	Sobrecarga	100,0	90,0	105/130	130	-	-
	Curto-circuito	150,0	150	250	250	-	-

Fonte: Filho (2015 p.106)

A resistência de sequência positiva é a própria resistência do condutor à corrente alternada dependendo do material utilizado, da temperatura de operação somada à temperatura do ambiente, do tipo de construção do condutor e do próprio cabo, o que pode ser visto pela equação 2.

$$R_p = R_{cc}(1 + Y_s + Y_p)m\Omega/m \quad (2)$$

Em que:

R_p = Resistência à corrente alternada, em mV/m;

R_{cc} = Resistência à corrente contínua a T °C, em mV/m;

Y_p = Componente que corrige o efeito de proximidade entre os cabos, devido a não uniformidade da densidade de corrente, em virtude do campo magnético criado pelos condutores vizinhos;

Y_s = Componente que corrige o efeito pelicular da distribuição de corrente na seção do condutor, em virtude do campo magnético criado pela própria corrente de carga. Normalmente, Y_s tem valor significativo para seções superiores a 185 mm².

Os cabos, durante o curto-circuito, sofrem esforços entre seus condutores de atração e repulsão, o que tende a movimentá-los. Para Filho (2015 p.153), “quando uma corrente atravessa um condutor, aparece uma força eletrodinâmica de repulsão ou atração que deve ser conhecida”, a equação 3 apresenta um método de definir esta força.

$$S_{cc} = \frac{\sqrt{T_e} \left(\frac{I_{3\phi}}{1000} \right)}{0,340 \sqrt{\log \frac{234 + T_f}{234 + T_i}}} \text{ (mm}^2\text{)} \quad (3)$$

Em que:

S_{cc} = Seção do condutor, em mm²;

$I_{3\phi}$ = Corrente de curto-circuito trifásica, em kA;

T_e = Tempo de duração da falta, em s;

T_f = Temperatura máxima admissível pelo cabo em regime de curto-circuito, em °C;

T_i = Temperatura máxima admissível pelo cabo para serviço contínuo, em °C. Os valores de T_f e T_{fi} em função da isolação estão estabelecidos na Tabela 3.

Para conectar os cabos aos barramentos e equipamentos são utilizadas terminações, muflas, terminais prensados ou soldados e estes definem a temperatura máxima para equação 3.

Filho descreve que (2015 p.154) “quando as conexões são realizadas com conectores desconectáveis normalmente são do tipo prensado, e o seu limite térmico é de 250°C, compatível com a isolação EPR ou XLPE. Logo, o valor de T_f

nesses casos fica limitado pelo tipo de conexão”, outros valores poderão ser encontrados com os fabricantes.

3.3.2 Disjuntores

Os disjuntores para uso em circuitos de baixa tensão, conhecidos como termomagnéticos, têm a função de proteger os circuitos das sobrecargas e sobre correntes. É composto basicamente de uma membrana que sofre deformação com a passagem de correntes acima do estabelecido o que permite o desligamento dos disjuntores.

Creder (2016 p.111) explica, que “os disjuntores termomagnéticos em caixa moldada são construídos de modo a atender às exigências da norma NBR 5361:1998, através de um disparador térmico bimetálico de sobrecargas, ou de um disparador magnético de alta precisão”. Já os disjuntores para circuitos normalmente usados em média e alta tensão, são dispositivos de manobras, eles abrem e fecham sobre comando de outro dispositivo, quase sempre os relés de proteção.

Filho (2015 p.325) explica que “os disjuntores sempre devem ser instalados acompanhados da aplicação dos relés respectivos, que são os elementos responsáveis pela detecção das correntes, tensões, potência, tec.” O conjunto disjuntor e relé executam a proteção dos circuitos.

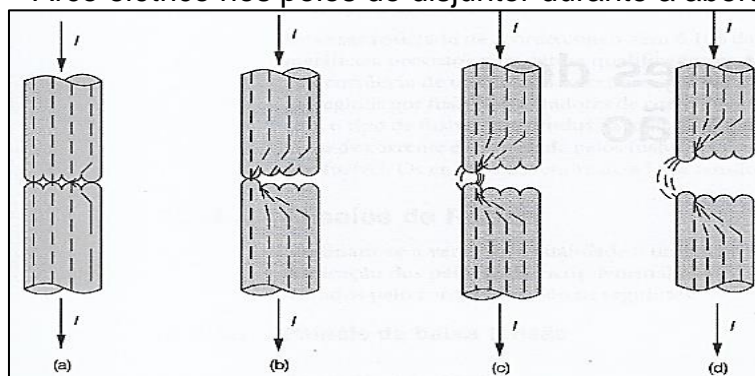
Os polos dos disjuntores (câmara de extinção de arco) são projetados para extinguir o arco sem que ele cause danos, para Filho (2015 p.327) “como princípio básico para a extinção de um arco elétrico qualquer, é necessário que se provoque o seu alongamento por meios artificiais, reduza a sua temperatura e substitua o meio ionizado entre os contatos por um meio isolante”. Os disjuntores são construídos de diversos materiais que permitem o alongamento dos contatos na abertura, propiciando a extinção do arco.

A figura 11 mostra o efeito do arco nos contatos de um disjuntor na abertura.

O óleo mineral isolante e largamente usado para extinguir os arcos dos disjuntores pelo fato que descreve Filho (2015 p.329) “como o arco elétrico apresenta uma temperatura excessivamente elevada, as primeiras camadas de óleo que tocam o arco são decompostas e gaseificadas, resultando na liberação de certa

quantidade de gases, compostos na sua maioria por hidrogênio”, os gases se deslocam para parte superior levando consigo o arco, resfriando e extinguindo-o.

Figura 11 - Arco elétrico nos polos do disjuntor durante a abertura.



Fonte: Filho (2015 p.327)

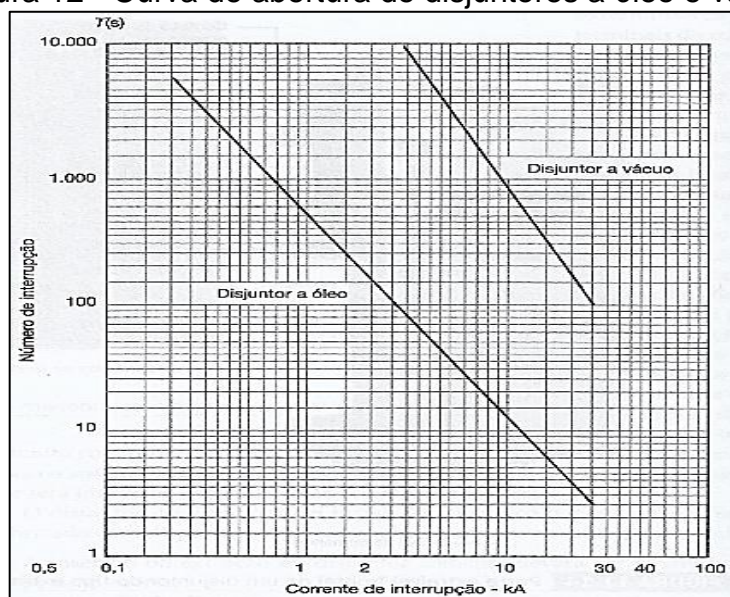
Os polos preenchidos de gás hexa fluoreto de enxofre seis – SF₆, têm capacidade de extinguir o arco com muita velocidade, este fato segundo Filho (2015 p. 329) tem como “princípio básico de interrupção em SF₆ se fundamenta em sua capacidade de levar rapidamente a zero a condutibilidade elétrica do arco, absorvendo os elétrons livres na região do mesmo, e de restabelecer com extrema velocidade a sua rigidez dielétrica” ... “isso porque o SF₆ é um gás eletronegativo, o que lhe propicia facilidades de capturar os elétrons livres presentes no plasma de um arco elétrico, reduzindo, portanto, a sua condutibilidade à medida que a corrente tende ao seu zero natural”.

Outro método utilizado nos polos dos disjuntores é a criação de um vácuo. O Vácuo é uma pressão negativa de valor muito pequeno segundo Filho (2015 p.330) “da ordem de 10⁻⁸ torr, que corresponde a uma pressão negativa de 1,3595 X 10⁻⁷ kg/m², ou seja, 1 torr equivale a 1 mm de coluna de mercúrio, ou 13,95 kg/m². ” Filho (2015 p.330) ainda explica que, “Mediante a separação dos contatos, surge um arco entre eles de grande intensidade, acompanhado de certa quantidade de vapor metálico resultante de uma pequena decomposição dos contatos formando um plasma.”

Os disjuntores se desgastam a cada manobra de desligamento e são limitados a números de manobras conforme orientação do fabricante. Os desligamentos em situação de carga estão descritos pela figura 12, onde pode ser observado a grande superioridade em números de manobras dos disjuntores a

vácuo em relação aos disjuntores a óleo mineral isolante, segundo Filho (2015 p.336) a figura 32 “refere-se a disjuntores de 400 A de corrente nominal e 25 kA/7,2 kV. Assim, pelo gráfico, um disjuntor a óleo pode interromper uma corrente de curto-circuito de 10 kA realizando 15 operações, enquanto o disjuntor a vácuo pode realizar 900 operações. ”

Figura 12 - Curva de abertura de disjuntores a óleo e vácuo.



Fonte: Filho (2015 p.336)

Portanto para se escolher corretamente um disjuntor deve se conhecer dentre outras caracterizas a Tensão nominal, Corrente nominal, Capacidade de ruptura nominal, potência de interrupção (simétrica), Corrente de ligação (simétrica), Tempo de desligamento e Tempo de interrupção.

3.3.3 Painéis

Painéis elétricos recebem diversos nomes que estão relacionados com sua aplicação como os Centros de Controle de Motores (CCM), Quadros de Distribuição de Luz (QDL) entre outros, são divididos em compartimentos, podem ser acoplados ou individual, dividido em vários compartimentos onde serão instalados os componentes medição, controle, acionamento, proteção entre outros. Os compartimentos de força são partilhados em compartimentos, tem a parte dos barramentos, manobras onde estão instalados os disjuntores, contadores, fusíveis, chaves e gavetas. Para Filho (2015 p.292) “os painéis podem ser projetados para

desempenhar diferentes funções dentro de uma instalação elétrica. Painel de comando quando nele são instalados equipamentos de comando e manobra de circuitos de baixa ou média tensão, tais como disjuntores, contactores, chaves seccionadoras, chaves inversoras, etc.”

A tensão nominal de um painel está diretamente ligada ao tipo de circuito. Para um circuito trifásico, deve ser considerada a tensão medida de uma fase para a outra, para Filho (2015 p.294) “tensão nominal é o valor da tensão a que é submetido o painel em condições normais de operação e que, associada à corrente nominal do circuito principal (barramento), determina a sua utilização”, e seus componentes devem suportar uma tensão de no mínimo a nominal.

A corrente nominal de um painel é aquela em que os componentes do circuito foram projetados para suportar sem que as temperaturas ultrapassem os valores definidos por normas. Diante de um curto-circuito os barramentos do painel sofrem os efeitos de atração e repulsão, conhecidos como dinâmicos. Os painéis devem ser projetados para suportar estas forças. Filho (2015 p.295) diz que “todos os elementos do painel que são atravessados pela corrente nominal de curto-circuito devem suportar termicamente e mecanicamente durante o tempo de operação do dispositivo de proteção nas condições de ensaio”.

A temperatura e a umidade estão relacionadas à especificação de um painel, para uma instalação abrigada. Filho (2015 p.295) define “à temperatura máxima de 140°C a umidade relativa do ar não deve exceder o valor de 50%”, e para uma condição ao tempo “a temperatura máxima de 125°C a umidade relativa do ar pode atingir temporariamente o valor de 100%”.

Os painéis são fabricados atendendo a um grau de proteção, descrito pela “ABNT NBR IEC 60529 – Graus de proteção providos por invólucros”, de dois algarismos onde o primeiro indica o grau de proteção quanto à penetração de corpos sólidos e contatos acidentais, e o segundo número indica o grau de proteção quanto à penetração de água internamente ao invólucro. Segundo Filho (2015 p.302) “os fabricantes de invólucros metálicos padronizam seus modelos para alguns tipos de grau de proteção, sendo os mais comuns os de proteção IP54, destinados a ambientes externos, e os de proteção IP53, utilizados em ambientes abrigados”. O que quer dizer que um painel com proteção IP54, estará protegido

contra o ingresso de poeiras e contra projeções de água, e quando se diz ser IP53 diz ser contra o ingresso de poeiras é protegido contra água aspergida.

Os painéis devem ser construídos para suportar o arco elétrico, devem ser projetados para desligar sem se danificar, para isto deve ser aplicado técnicas de detecção do arco elétrico e sua devida eliminação. Para Filho (2015 p.312) “a proteção contra arcos internos tem por objetivo evitar que um defeito no interior do painel metálico, algumas vezes seguido de um arco com intensidade proporcional à corrente de falta, provoque o rompimento das suas partes frontais e/ou laterais que, arremessados para fora, atinjam as pessoas presentes no ambiente. Esses acidentes têm consequências imprevisíveis, podendo ocasionar queimaduras graves associadas ou não a lesões no corpo das pessoas.” Os painéis também devem ter aberturas para alívio de pressão e saída dos gases gerados durante o arco elétrico.

Muito importante para definir um painel é a corrente máxima do circuito e a corrente de curto-circuito usadas para definir os diâmetros dos barramentos normalmente retangulares de cobre. Filho (2015 p.314) descreve que a “corrente máxima da carga conectada para a determinação da seção inicial do barramento deve-se conhecer a corrente correspondente à carga máxima a ser conectada no mesmo”.

As tabelas fornecem as seções padronizadas de barras retangulares, outros valores de correntes devem ser feitos por encomendas ou com combinação de barras. De posse das correntes nominais dos circuitos pode-se escolher através da tabela 4 as dimensões dos barramentos, com seu valor de impedância.

Tabela 4 - Referência para escolha de barras de cobre (adaptado)

Barras de cobre retangulares para uso interior de painéis											
Largura	Espessura	Seção	Peso	Resistência	Reatância	Capacidade de corrente permanente (A)					
						Barra pintada			Barra nua		
						Números de barras por fase					
mm	mm	mm ²	Kg/m	mohm/m	mohm/m	1	2	3	1	2	3
12	2	23,5	0,209	0,9297	0,2859	123	202	228	108	182	216
	2	29,5	0,262	0,7406	0,2774	148	240	261	128	212	247
15	3	44,5	0,396	0,4909	0,2619	187	316	381	162	282	361
	2	39,5	0,351	0,5531	0,2664	189	302	313	162	264	298

Continuação Tabela 4 - Referência para escolha de barras de cobre(adaptado)

	3	59,5	0,529	0,3672	0,2529	273	394	454	204	348	431
20	5	99,1	0,882	0,2205	0,2317	319	560	728	274	500	690
	10	199,0	1,770	0,1098	0,2054	497	924	1.320	427	825	1.180
	3	74,5	0,663	0,2932	0,2424	287	470	525	245	412	498
25	5	125,0	1,110	0,1748	0,2229	384	662	839	327	586	795
	3	89,5	0,796	0,2441	0,2355	337	544	593	285	476	564
30	5	140,0	1,330	0,1561	0,2187	447	760	944	379	267	896
	10	299,0	2,660	0,0731	0,1900	676	1.200	1.670	573	1.060	1.480
	3	119,0	1,050	0,1836	0,2248	435	692	725	366	600	690
40	5	199,0	1,770	0,1098	0,2054	573	952	1.140	482	836	1.090
	10	399,0	3,550	0,0548	0,1792	850	1.470	2.000	715	1.290	1.770
	5	249,0	2,220	0,0877	0,1969	697	1.140	1.330	583	994	1.260

Fonte: Filho (2015 p.314)

Com a equação 4 define-se a força de atração e repulsão e assim definir os pontos de fixação das barras o quanto os painéis e estruturas devem suportar diante de um curto-circuito.

$$F_b = 2,04 \left(\frac{I_{cim}^2}{10 * D} \right) L_b \text{ (kgf)} \quad (4)$$

Em que:

F_b = Força de atração ou repulsão exercida sobre as barras, em kgf;

D = Distância entre as barras, em cm;

L_b = Comprimento da barra, isto é, distância entre dois apoios, em cm;

I_{cim} = Corrente de curto-circuito, tomada no seu valor de crista, em kA.

Conforme Filho (2015 p.316) “a seção transversal das barras deve ser suficientemente dimensionada para suportar a força F , sem deformar-se. Os esforços resistentes das barras podem ser calculados por meio das Equações 5 e 6”.

$$W_b = \frac{B * H^2}{6000} \text{ (cm}^3\text{)} \quad (5)$$

$$M_f = \frac{B_f * L_b}{12 * W_b} (kgf/cm^2) \quad (6)$$

Em que:

W_b = Momento resistente da barra, em cm³;

M_f = Tensão à flexão, em kgf/cm²;

H = Altura da seção transversal, em mm;

B = Base da seção transversal, em mm.

3.3.4 Fusíveis

Os circuitos elétricos estão presentes em praticamente todos os lugares, diante deste fato, se faz necessário obter segurança dos mesmos, a questão proteção admite um peso grande diante da obrigação de preservar a integridade física das pessoas e dos equipamentos envolvidos.

Para Filho (2014 p.54) “os fusíveis são componentes destinados à proteção contra sobrecorrentes elétricas do tipo curto-circuito e sobrecarga de longa duração”. São ligados em série, sendo necessário um para cada fase do circuito a que se deseja proteger. Como o elemento fusível é construído para ser mais sensíveis a corrente que o define, tem como princípio de funcionamento a fusão, rompimento e abertura do circuito, podendo ter aberturas distintas e se faz necessário a substituição dos fusíveis abertos e seus parceiros que não romperem, prática que se justifica, pois, o fusível que não rompeu pode ter sofrido o mesmo esforço dos demais e está com seu corpo danificado.

Muito usado em média tensão, pelo seu custo reduzido diante de outras técnicas de proteção com relés, TC's, TP's e disjuntores, geralmente, usados junto a um dispositivo de abertura, pois não possuem capacidade de seccionamento, mas não é recomendado como única proteção contra sobre carga, como define Filho (2014 p.61) “a aplicação de fusíveis como elemento de proteção contracorrente de sobre carga não é aconselhável, pois este atua com uma intensidade de corrente com variação em torno de 1,4 vezes o seu valor nominal, não havendo, portanto, uma margem de segurança aceitável”.

Para Filho (2014 p.55) “a maioria dos fusíveis possui na sua parte interna um material granulado chamado extintor, normalmente areia de quartzo, o qual realiza a

função de eliminar a formação do arco elétrico, ocupando o lugar do elemento fusível”.

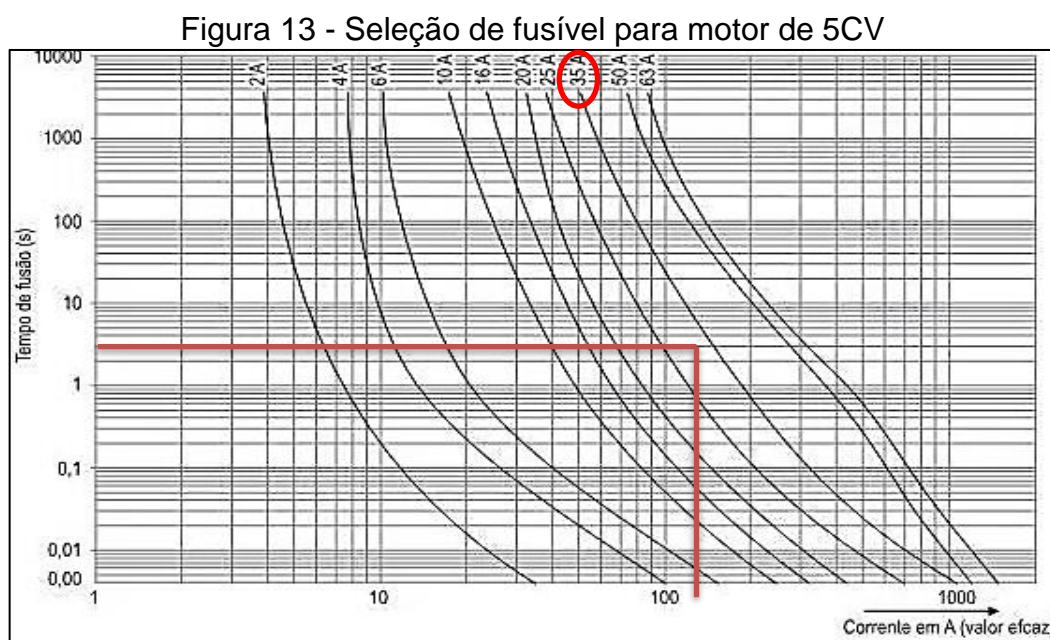
Filho (2014 p.61) “a partir de um catálogo de motores elétricos, são obtidas as seguintes informações:

Corrente elétrica nominal do motor (I_N motor=13,8 A);

Relação entre a corrente de partida (IP) e corrente nominal: $I_P/I_N=10$;

Com as informações do motor, chega-se ao valor da corrente de partida (IP) igual a 113,16 A. Juntamente com o tempo de partida (tP) igual a cinco segundos, é possível selecionar o fusível a partir das curvas características dos fusíveis de 2 a 63 (A), como mostrado na figura 13. A intersecção dos valores de IP e tP determina a escolha do fusível de 35 A.”

Os fabricantes de fusíveis padronizaram os valores para facilitar a fabricação e comercialização, já como os valores definidos, busca-se nas tabelas o que mais se aproxima dentro das condições estabelecidas.



3.3.5 Transformadores de Correntes TC's

Os transformadores de corrente elétrica têm finalidade simples de converter as altas correntes dos circuitos em uma corrente geralmente de 1 ou 5 ampères. Com objetivo de ligar os circuitos de centenas de amperes a uma corrente reduzida

para os relés, medidores de consumo, qualidade de energia, entre outros, com finalidade de medição e proteção. Seu funcionamento se assemelha ao transformador com o princípio de transferência magnética, que tem em seu primário um número de espiras pequenas, e em seu secundário um número de espiras que proporciona a relação exata de 1 ou 5 amperes. Para Filho e Mamede (2017 p.54) “a corrente primária a ser medida, circulando nos enrolamentos primários, cria um fluxo magnético alternado que faz induzir as forças eletromotrizes E_p e E_s , respectivamente, nos enrolamentos primário e secundário”.

O RTC é relação de transformação de corrente de um TC está relacionado com a corrente do primário e corrente secundária, ou seja, se dissermos que o TC tem RTC de 20, e obtém em seu secundário uma corrente de 5A, a corrente de primário deve ser 100A, conforme escreve FILHO e Mamede (2017 p.54) “dessa forma, se nos terminais primários de um TC cuja relação de transformação nominal é de 20 circular uma corrente de 100 A, obtém-se no secundário a corrente de 5 A, ou seja: $100/20 = 5 \text{ A}$ ”.

Os TC's podem ser construídos para atender a diversas finalidades, ser construídos do tipo seco em resina epóxi, à base de óleo mineral isolante, com núcleo de ferro magnético ou de ar. O TC de barra é muito utilizado estando presente em quase todos os painéis de média e alta tensão, FILHO e Mamede (2017 p.55) descreve o TC de janela como “aquele que não possui um primário fixo no transformador e é constituído de uma abertura através do núcleo, por onde passa o condutor que forma os circuitos primários”, geralmente aplicados em medição de correntes de neutro ou ground, pois proporciona a passagem de mais de um condutor de fase e neutro.

A especificação dos TC's precisa-se levar em consideração a carga que vai ser ligada em seu secundário, não deve causar perda de exatidão, para Mamede (2011 p.64) a “carga secundária nominal é a impedância ligada aos terminais secundários do TC, cujo valor corresponde à potência para a exatidão garantida, sob corrente nominal”.

Os TC's para proteção devem ser capazes de manter a exatidão de corrente e não saturar com correntes 20 vezes a corrente nominal de 5 amperes, pois eles devem informar aos relés com o máximo de precisão para uma proteção mais assertiva. Um TC's de proteção como os dizeres 10H200 nos informa que permite

um erro de 10%, ou seja, permite um erro na relação de transformação sem satura para uma corrente 20 vezes a nomina. A letra (H) representa alta reatância e (L) baixa reatância e o último número define a tensão do secundário.

3.3.6 Transformadores de Potencial TP's

Transformadores de potencial (TP) têm a função de converter valores de dezenas de kilo volts em valores geralmente da ordem de 115 ou $115\sqrt{3}$ em seu secundário, que será ligado aos terminais dos relés de medidores de grandezas elétricas. São construídos de material epóxi, o que o torna descartável a quando em falha, não existem reparos. Para Filho (2015 p.216) “se o transformador for construído em epóxi, o núcleo com as respectivas bobinas é encapsulado através de processos especiais de modo a evitar a formação de bolhas no seu interior, o que, para tensões elevadas, se constitui num fator de defeito grave”, as bolhas proporcionam as descargas parciais que por sua vez destroem o isolamento do TP, deteriorando gradativamente.

Os TP's são basicamente de dois tipos construtivos, o mais comum, o indutivo, construídos para até nível de tensão de 138kV, e composto de uma bobina primária e uma secundária enroladas em um núcleo. Seu funcionamento é similar ao de um transformador eletromagnética, convertendo tensão do primário para o secundário, descrito por Filho (2015 p.216) “para uma determinada tensão aplicada nos enrolamentos primários, obter-se nos terminais secundários uma tensão reduzida dada pelo valor da relação de transformação de tensão”.

O segundo método construtivo é o capacitivo, conforme descreve Filho (2015 p.219) “são construídos basicamente com a utilização de dois conjuntos de capacitores que servem para fornecer um divisor de tensão e permitir a comunicação através do sistema carrier”, normalmente usados para tensões iguais ou superior a 138kV, usados em sistemas de transmissão devido seu valor de tensão elevados.

A RTP relação de transformação de potencial de um TP e dada pela tensão do primário dividido pela tensão secundária desejada. Vale observar que para os TP's a tensão secundária não deve variar, diferentemente do TC's que mantem constante a corrente.

3.3.7 Motores de Indução

Os motores são divididos em dois grupos, os de fabricados para serem alimentados por tensão contínua e os por corrente alternada. Os motores de corrente alternada se dividem em monofásicos, linear e trifásicos de dois modelos os síncronos que segundo Mamede (2018 p.238) “os motores síncronos funcionam a partir da aplicação de uma tensão alternada nos terminais do estator, excitando o campo rotórico por meio de uma fonte de corrente contínua” que pode ser própria ou de uma fonte externa ao motor.

E os assíncronos de rotor em gaiola ou de rotor bobinado. Segundo Mamede (2018 p.235) “o princípio de funcionamento dos motores assíncronos trifásicos que constituem a maioria dos motores em operação nas indústrias está baseado em três enrolamentos instalados no estator, que estão diretamente ligados na fonte de tensão, deslocados fisicamente de 120°”. A energia fornecida pelas concessionárias de energia no Brasil tem suas fases também defasadas em 120°C, na frequência de 60HZ, o que define a velocidade do campo girante do motor e, conseqüentemente, sua velocidade.

A corrente de um motor pode ser calculada pela equação 7.

$$I_{nm} = \frac{736 * P_{nm}}{\sqrt{3} * V * n * \cos\psi} \quad (A) \quad (7)$$

Em que:

P_{nm} = Potência nominal do motor, em CV; para se ter o valor em kW basta multiplicar por 736, se o valor estiver em HP, multiplica-se por 746;

V = Tensão nominal trifásica, em volts;

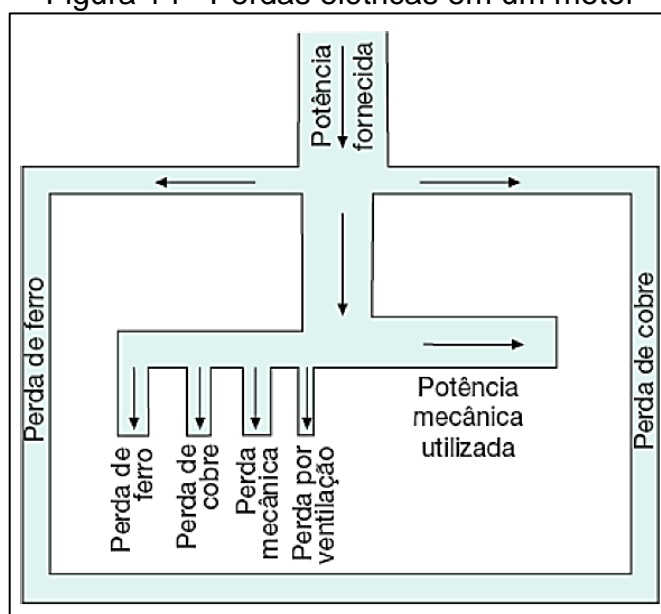
n = Rendimento do motor;

$\cos\psi$ = Fator de potência sob carga nominal.

Um motor converte energia elétrica em força mecânica com uma quantidade de perdas que está representada na figura 14, onde a potência elétrica fornecida pela fonte se perde na forma de calor no cobre e no entreferro da máquina: se perde para ventilar, reduzir a sua temperatura, perdas mecânicas nos rolamentos.

A temperatura de um motor é muito importante pois com aumento acima dos limites definidos, além de perdas de energia diminui sua vida útil. As classes de temperaturas são representadas pelas letras A, E, B, F e H, que tem como limite máximo de temperatura 105, 120, 130, 155 e 180°C devido a diferentes tipos de materiais isolantes. Para saber as temperaturas dos motores, instala-se sensores em pontos diferentes que abrangem uma grande parte do motor, o que auxilia no seu controle.

Figura 14 - Perdas elétricas em um motor



Fonte: Mamede (2018 p.265)

Segundo Mamede (2018 p.265), “os motores elétricos, durante a partida, solicitam da rede de alimentação uma corrente de valor elevado, da ordem de seis a dez vezes sua corrente nominal” por um curto período de tempo, que se caracteriza pela quebra da inércia até o regime nominal. Mamede (2018 p.265) ainda explica que “o tempo de partida dos motores, normalmente da ordem de 0,5 a 10 s”, motores específicos podem ter valores de corrente de partidas maiores, bem como seu tempo de partida.

Dentre os métodos de partida de motores, o de partida direta é o mais simples, consiste na ligação direta da tensão nominal aos terminais do motor e tem como desvantagem, provocar uma queda de tensões na rede, portanto se estuda e desenvolve outros métodos de partidas, como os inversores de frequência, *soft-starters* que segundo Mamede (2018 p.285) “reduzir a corrente de partida durante o

acionamento dos motores elétricos, conseqüentemente, reduzindo a queda de tensão no sistema de alimentação”, outros métodos como autotransformadores para partidas, também diminuem as tensões nos terminais dos motores, conseqüentemente, diminuem as correntes de partidas, este método se aplica a cargas de baixa tensão.

Para proteger os motores são usadas diversas funções de proteção, como proteção de sobrecorrente de fase e neutro nas condições de sobre cargas longas ou instantâneas, desbalanço de corrente, falta de fase, frequência, sobre e sub tensão, de imagem térmica, monitoramento de partidas em uma hora entre outras.

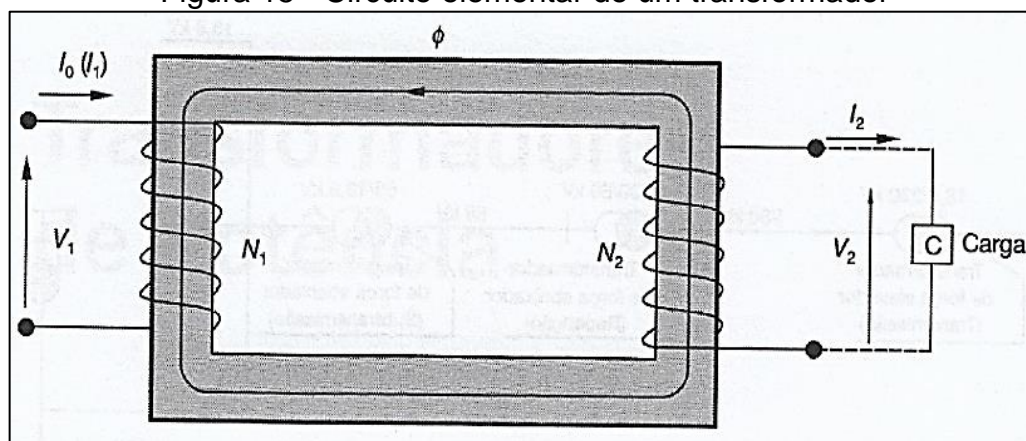
Para definir os valores de corrente de ajuste dos relés de corrente basta dividir a corrente nominal pela relação de transformação dos TC's. O ajuste de curto circuito deve permitir o motor partir dentro do tempo definido com o rotor bloqueado se a corrente permanecer no valor de partida no tempo definido pelo fabricante como rotor bloqueado, a função 46 rotor bloqueado deve atuar, desligando o motor e não a função 50 que só atuaria para um valor de corrente maior.

O tempo para ajuste da unidade temporizada deve ser superiores ao tempo de partida de fase e são informados nas placas, deve também estar abaixo do tempo de rotor bloqueado. O intervalo de coordenação deve ser ajustado considerando o tempo de coordenação e deve ser grande o suficiente para o dispositivo interromper a corrente sem danificar o motor.

3.3.8 Transformadores

Os transformadores têm a função primária de converter energia na forma de tensão (V_1) e corrente (I_1) do lado da fonte, aplicadas ao número de espiras (N_1) ambos do primário, transferindo na forma de fluxo magnético pelo núcleo, ao lado da carga, secundário, que terá um número de espiras (N_2), relação tal que fornecerá uma tensão (V_2) e uma corrente (I_2) como pode ser visto na figura 15.

Figura 15 - Circuito elementar de um transformador



Fonte: Filho (2015 p.370)

Os transformadores são construídos para ligação em uma, duas ou três fases, e recebem nome de Monobuchas, Bifásicos ou Trifásicos. Os transformadores trifásicos conforme Filho (2015 p.379) “são constituídos de um núcleo de lâminas de aço empacotadas, com colunas envolvidas por um conjunto de bobinas, normalmente, de fios de cobre, que formam os enrolamentos primários e secundários”.

Do ponto de vista de magnetização de um transformador, ou corrente de (Inrush) conforme Madergan (2012 p.280) “o pick-up da unidade instantânea do primário deve ser ajustado para atuar 10% acima do curto-circuito subtransitório assimétrico no secundário referido ao primário”, quando não informado pelo fabricante pode usar como referência o que descreve Mamede (2011 p.302) “a corrente de energização dos transformadores pode ser considerada, de forma geral, para ajuste da proteção, com valor igual a 8 vezes a sua corrente nominal”. Para Madergan (2012 p.272) “Transformadores a seco, todos $I_{inrush} = 14X I_n$, ... no tempo de 100ms”.

As perdas internas do transformador geram calor e perda de eficiência. Para uma troca térmica mais rápida, se constrói os transformadores em sua maioria com o núcleo e as bobinas imersos em óleo isolante. Também se instala ventiladores acoplados na parte externa dos radiadores e sensores de temperatura no óleo, que monitora e controla a ventilação.

3.4 Metodologia para calcular energia incidente

Para efetuar o cálculo da energia incidente, utilizam-se referências de normas técnicas oficiais conforme item 10.1.2 da NR10. “Esta NR se aplica às fases de geração, transmissão, distribuição e consumo, incluindo as etapas de projeto, construção, montagem, operação, manutenção das instalações elétricas e quaisquer trabalhos realizados nas suas proximidades, observando-se as normas técnicas oficiais estabelecidas pelos órgãos competentes e, na ausência ou omissão destas, as normas técnicas internacionais cabíveis”.

Conforme item 4.6 da Norma Brasileira Regulamentadora (NBR 16384), a vestimenta de proteção contra queimadura deve ser especificada de acordo com o nível de energia incidente, por meio de metodologia internacionalmente reconhecida, e no item 4.7 determina que os estudos de energia incidente do arco elétrico devem estar atualizados e disponíveis.

Também de acordo com a Norma Regulamentadora (NR 6) que trata dos EPIs (Equipamento Proteção Individual) obriga o uso de macacão ou conjunto de segurança de proteção do tronco e membros contra chamas e ou agentes térmicos.

As NRs são superficiais quando comparadas aos métodos de cálculo de energia incidente com relação às normas internacionais. Além disso, nelas não há definição de características, processos de fabricação, testes e formas de seleção de vestimentas de proteção contra arcos elétricos. E por isso, em seu texto, há indicação de recorrer às normas internacionais o item 10.1.2 da NR10.

Como ainda no Brasil, não existem normas técnicas nacionais específicas sobre energia incidente devido ao arco elétrico, utilizam-se normas internacionais vigentes como base técnica. Para efetuar os cálculos de energia incidente devido ao arco elétrico, são utilizadas algumas linhas de raciocínio e modelos de cálculo.

- Ralph Lee: Método da Máxima Energia Incidente (Teórico);
- NFPA 70E: Aproximação para Baixa Tensão do Método Teórico;
- IEEE 1584: Modelo Empírico Baseado em Ensaio Normalizados.

Os métodos citados acima possuem características próprias, considerando-se diferentes variáveis e modelos matemáticos. Para uma escolha correta das vestimentas de proteção, é fundamental uma escolha correta do método, para evitar o superdimensionamento dos EPIs, que além de inaplicáveis, podem contribuir para

outros riscos e investimentos significantes. Portanto, dentre os três métodos citados acima, o da NFPA 70E e IEEE 1584 são os mais utilizados na indústria. Porém, quando os limites desses dois métodos são ultrapassados, o método de Ralph Lee poderá ser utilizado.

Conforme a NFPA 70E (2015), “os cálculos de energia incidente devem ser realizados com objetivo de determinar os EPIs necessários para trabalhos a uma distância que represente riscos de queimaduras em função de arco elétrico”. Mas se o trabalho for realizado a uma distância segura de aproximação, os cálculos de energia incidente são dispensáveis. Uma distância segura de aproximação é considerada a distância da fonte do arco elétrico na qual uma energia de 5,0J/cm² ou 1,2 cal/cm² incide sobre uma pessoa sem EPI, provocando-lhe queimadura de segundo grau. Para estimar o valor da energia incidente a NFPA 70E (2015) possui duas metodologias. Sendo a primeira o Método Teórico, que estima a energia incidente em um valor teórico máximo, baseado nos estudos de Ralph Lee. Esse método é aplicável para arcos elétricos ocorridos em ambiente aberto e uma tensão maior que 600V e a energia incidente pode ser calculada pela equação 8.

$$E_i = \frac{793 * I_{bf} * V * t}{D^2} \quad (8)$$

Em que;

E_i = Energia máxima incidente, em cal/cm²;

I_{bf} = Corrente de curto-circuito, em KA, dentro dos limites 16-50 KA;

V = Tensão de linha em KV;

t = Tempo de duração do arco em segundos;

D = Distância do ponto de trabalho do arco elétrico, em polegadas.

Os valores de energia incidente por esse método são muito altos, por ser um modelo teórico. Para arcos elétricos em ambiente aberto, a NFPA 70E (2015) disponibiliza a equação 9 abaixo para estimativa da energia incidente.

$$E_{MA} = 5271 * D^{-1,9593} * t * [0,0016I_{bf}^2 - 0,0076I_{bf} + 0,8938] \quad (9)$$

Em que:

E_{MA} = Energia incidente máxima em ambiente aberto, em cal/cm²;

D = Distância do ponto de trabalho do ponto de arco elétrico, em polegadas;

t = Tempo de duração do arco em segundos;

I_{bf} = Corrente de curto-circuito, em KA, dentro dos limites 16-50 KA;

De acordo com NFPA 70E (2015), para arcos elétricos ambientes fechados aplica-se a equação 10 para estimativa da energia incidente.

$$E_{MB} = 1038,7 * D^{-1,4738} * t * [0,0093I_{bf}^2 - 0,3453I_{bf} + 5,9675] \quad (10)$$

Em que:

E_{MB} = Energia incidente máxima em ambiente fechado, em cal/cm²;

D = Distância do ponto de trabalho do ponto de arco elétrico, em polegadas;

t = Tempo de duração do arco em segundos;

I_{bf} = Corrente de curto-circuito, em KA, dentro dos limites 16-50 KA;

A metodologia, para a estimativa de cálculo da energia incidente pela IEEE1584b-2011, foi desenvolvida com base nas estatísticas retiradas de vários testes em laboratório. Por esse motivo os cálculos tendem a ser mais realista se comparados com o modelo teórico proposto por Ralf Lee, resultando em níveis de energia incidente com valores menores para uma mesma planta. O método da IEEE 1584b-2011 evita que o trabalhador utiliza uma proteção exagerada, propiciando mais conforto durante as atividades laborais.

Conforme o método da IEEE 1584b-2011, para a estimativa da energia incidente e determinação do EPI correto, serão necessários seguir as nove etapas conforme a tabela 5.

Tabela 5 - Sequência de passos para estimativa da energia incidente e determinação dos EPIs adequados pelo método IEEE 1584b-2011 (Adaptado)

Passo	IEEE 1584
01	Coleta de dados da instalação e do sistema
02	Determinar os modos de operação do sistema
03	Determinar a corrente de curto-circuito
04	Determinar a corrente do arco elétrico
05	Encontrar as características dos dispositivos de proteção e tempo de duração do arco
06	Determinar as tensões dos sistemas e a classe dos equipamentos
07	Determinar a distância de trabalho
08	Calcular a energia incidente em todos os equipamentos
09	Determinar a distância segura de aproximação contra arco elétrico

Fonte: IEEE 1584b-2011

Segue abaixo a sequência e o detalhamento de cada etapa para calcular a energia incidente conforme o método IEEE 1584b-2011.

- 1º Passo: Coletar os dados da instalação e do sistema.

Nesta etapa realiza-se a coleta de todos os dados do sistema elétrico, tais com diagramas unifilares atualizados, considerar alimentadores alternativos e circuitos de distribuição de baixa tensão. Em seguida providenciar os dados para o cálculo de curto-circuito, considerando todas as fontes de energia, incluindo, principalmente, a concessionária, motores acima de 37 KW e geradores auxiliares.

Os diagramas devem mostrar os circuitos de distribuição, linhas de transmissão, transformadores, sistemas de aterramento, capacitores, disjuntores, limitadores de corrente e CCMs. Os painéis e cubículos também devem ser considerados, incluído os equipamentos de proteção, alimentadores e circuito derivados, fusíveis, bem como motores com tensão abaixo de 600 V e os transformadores destinados aos sistemas de proteção. Já os equipamentos com tensão abaixo de 240 V não precisam ser considerados a não ser que possuam potência mínima de 125KVA.

- 2º Passo: Determinar os modos de operação do sistema.

Nessa etapa é necessário analisar todos os modos de operação do sistema elétrico. Conforme a IEEE 1584b-2011, para sistemas radiais existe somente um modo de operação normal, mas existem sistemas complexos que tem vários modos de operação. E sempre considerar o modo de operação que tem o maior valor da corrente de curto-circuito.

- 3º Passo: Determinar a corrente de curto-circuito.

Nesta etapa para calcular a corrente de curto-circuito, todas as informações relacionadas ao diagrama unifilar e dados dos equipamentos devem ser inseridos em um programa específico para cálculo da corrente de curto-circuito. Também devem ser incluídos os cabos elétricos com suas informações de comprimento e impedância.

- 4º Passo: Determinar a corrente do arco elétrico.

Nesta etapa é calculada a corrente do arco elétrico nos pontos de interesse da planta quanto ao risco do arco elétrico. Calcula-se também o valor da corrente que passa no equipamento de proteção à montante do local envolvendo o arco. Para determinar os valores da corrente do arco elétrico utiliza-se a equação 11 para baixa tensão (até 1 KV). Conforme a norma IEEE 1584b-2011.

$$\log I_a = K + 0,662 \cdot \log I_{bf} + 0,966 \cdot V + 0,0000526 \cdot G + 0,5588 \cdot V(\log I_{bf}) - 0,00304 \cdot G \cdot (\log I_{bf}) \quad (11)$$

Em que:

\log = Logaritmo na base 10;

I_a = Corrente do arco elétrico;

I_{bf} = Corrente de curto-circuito para uma falta trifásica;

K = É -0,153 para arco em ambiente aberto, -0,097 para arco em ambiente fechado;

V = Tensão do sistema em KV;

G = Distância entre condutores em milímetros.

Para ambiente aberto ou fechado com tensão de 1 a 15 KV a equação 12 deverá ser utilizada conforme a norma IEEE 1584b-2011.

$$\log I_a = 0,00402 + 0,983 \log I_{bf} \quad (12)$$

Em que:

\log = Logaritmo na base 10;

I_a = Corrente do arco elétrico;

I_{bf} = Corrente de curto-circuito para uma falta trifásica.

Em seguida, converte o logaritmo conforme a equação 13.

$$I_a = 10^{\log I_a} \quad (13)$$

Ainda nesta etapa calcula-se uma segunda corrente do arco elétrico equivalente a 85% da I_a , para determinar um segundo tempo de duração do arco.

- Etapa 05: Encontrar as características dos dispositivos de proteção e tempo de duração do arco.

Nesta etapa, recomenda-se que os dados sejam retirados do sistema de proteção dos equipamentos em campo. Caso não seja possível encontrar os parâmetros de proteção, os cálculos poderão ser efetuados com softwares específicos, ou caso a planta analisada seja simples, pois as características dos dispositivos de proteção poderão ser encontradas nos manuais dos fabricantes.

- Etapa 06: Determinar as tensões dos sistemas e classe dos equipamentos.

Nesta etapa, deve-se documentar para cada barramento o tipo de equipamento e a tensão do sistema elétrico, conforme tabela 6, com objetivo de identificar a distância entre os barramentos.

Tabela 6 - Tipo de equipamento e distância típica entre barramentos (Adaptado tabela 2 IEEE 1584b-2011)

TIPO DE EQUIPAMENTO	DISTÂNCIA TÍPICA ENTRE OS CONDUTORES (mm)
Painel de 15 KV	152
Painel de 5 KV	104
Painel de baixa tensão	32
CCMs quadros elétricos de baixa tensão	25
Cabos	13
Outros	Não necessário

Fonte: IEEE 1584b-2011

➤ 7º Passo: Determinar a distância de trabalho.

Neta etapa conforme a IEEE 1584b-2011, “a proteção contra arco elétrico é sempre baseada no nível de energia incidente que atinge suas mãos e braços”. O nível do dano depende do percentual da pele de uma pessoa que sofre uma queimadura. Pois o corpo e a cabeça de uma pessoa representam a maior parte da superfície do corpo do ser humano, por esse motivo as queimaduras nessas regiões do corpo são mais graves do que aquelas ocorridas nos membros. A tabela 7 apresenta as distâncias típicas de acordo com os tipos de equipamentos.

Tabela 7 - Tipo de equipamento e distância de trabalho típica (Adaptado da tabela 3 IEEE 1584b-2011)

TIPO DE EQUIPAMENTO	DISTÂNCIA DE TRABALHO TÍPICA (mm)
Painel de 15 KV	910
Painel de 5 KV	910
Painel de baixa tensão	610
CCMs quadros de baixa tensão	455
Cabos	455
Outros	A ser determinada em campo

Fonte: IEEE 1584b-2011

- 8º Passo: Calcular a energia incidente em todos os equipamentos.

Nesta etapa, a própria IEEE 1584b-2011 disponibiliza uma planilha em Excel para efetuar o cálculo da energia incidente, conforme apresentado no capítulo 6 da norma, ou recomenda a utilização de software para calcular a energia incidente.

Para efetuar os cálculos de energia incidente, deverá, primeiramente, estabelecer o valor da energia normalizada. Segundo a IEEE 1584b-2011, “a energia incidente normalizada é baseada em valores normalizados para um arco de 200ms de duração e uma distância de 610 mm entre o ponto de origem do arco e uma pessoa”. Para calcular energia normalizada da norma IEEE 1584b-2011 utiliza-se a equação 14.

$$\log E_n = K_1 + K_2 + 1,081 \cdot \log I_a + 0,0011 \cdot G \quad (14)$$

Em que:

\log = Logaritmo base 10;

E_n = Energia incidente normalizada (J/cm²) para tempo de 200ms de distância de 610mm;

K_1 = É -0,792 para ambiente aberto, e -0,555 para ambiente fechado;

K_2 = É 0 para sistema isolado ou aterrado por alta resistência, e -0,113 para sistema solidamente aterrado;

G = Distância entre condutores em mm.

$$E_n = 10 \log E_n \quad (15)$$

E para obter a energia incidente a partir da energia normalizada, aplica-se a equação 16.

$$E = 4,184 C_f E_n \left(\frac{t}{0,2} \right) \left(\frac{610^x}{D^x} \right) \quad (16)$$

Em que:

E = Energia incidente (J/cm²);

C_f = Fator de cálculo, 1,0 para tensão acima de 1 KV, e 1,5 para tensão igual ou menos do que 1 KV;

E_n = Energia incidente normatizada;

t = Tempo do arco em segundos;

D = Distância do possível ponto do arco para uma pessoa, medida em milímetros;

x = Expoente de distância, conforme tabela.

Para determinar o expoente de distância (x), utiliza a tabela 8 extraída da IEEE 1584.

Tabela 8 - Fatores para equipamento e classe de tensão (Adaptado)

TENSÃO DO SISTEMA (KV)	TIPO DE EQUIPAMENTO	DISTÂNCIA TÍPICA ENTRE CONDUTORES (mm)	EXPOENTE DA DISTÂNCIA
0,208 – 1,0	Ambiente aberto	10 - 40	2,000
	Painel de distribuição	32	1,473
	CCM e Painel	25	1,641
	Cabos	13	2,000
>1 – 5	Ambientes aberto	102	2,000
	Painel de distribuição	13 - 102	0,973
	Cabos	13	2,000
>5 – 15	Ambiente aberto	13 - 153	2,000
	Painel de distribuição	153	0,973
	Cabos	13	2,000

Fonte: IEEE 1584b-2011

Para obter o valor da energia incidente aplica-se a equação 17.

$$E = E_n \left(\frac{t}{0,2} \right) \left(\frac{610^x}{D^x} \right) \quad (17)$$

Em que:

E = Energia incidente (cal/cm²);

E_n = Energia incidente normatizada;

t = Tempo do arco, em segundos;

D = Distância do ponto do arco para uma pessoa (mm);

x = Expoente de distância.

- 9º Passo: Obter a distância segura de aproximação contra arco elétrico.

Para a IEEE 1584b-2011, uma distância segura de aproximação é a distância da fonte do arco elétrico na qual 5,0 (j/cm²) ou 1,2 (cal/cm²), incide em uma pessoa sem proteção (EPI), causando Ihe queimaduras de segundo grau.

Para obter a distância de aproximação segura, utiliza-se a equação 18.

$$D_B = \left[4,184 C_f E_n \left(\frac{t}{0,2} \right) \left(\frac{610^x}{E_B} \right) \right]^{\frac{1}{x}} \quad (18)$$

Em que:

D_B = Distância de aproximação do ponto do arco elétrico, em (mm);

C_f = Fator de cálculo de 1,0 para tensão acima de 1KV e 1,5 para tensão abaixo de 1 KV;

E_n = Energia incidente normatizada;

E_B = Energia incidente na distância de proteção;

t = Tempo do arco em segundos;

x = Expoente de distância.

3.5 Relé de proteção

Cunha (2009) explica que, “os relés são dispositivos elétricos que são destinados a produzir modificações súbitas e predeterminadas em um ou mais circuitos elétricos de saída – quando alcançadas determinadas condições no circuito de entrada, que é o que controla o dispositivo”. Sua função é fazer atuar o seu sistema de manobra e não interromper o circuito principal.

Os relés são ajustados para executar ações dependendo da intensidade das correntes em um determinado tempo, podendo assim ser expressas por equações, que didaticamente serão representadas pelas curvas, gráficos de corrente em função do tempo. Alguns relés digitais disponibilizam uma seção para o usuário implementar curvas que melhor Ihe atenda para as diversas condições de proteção.

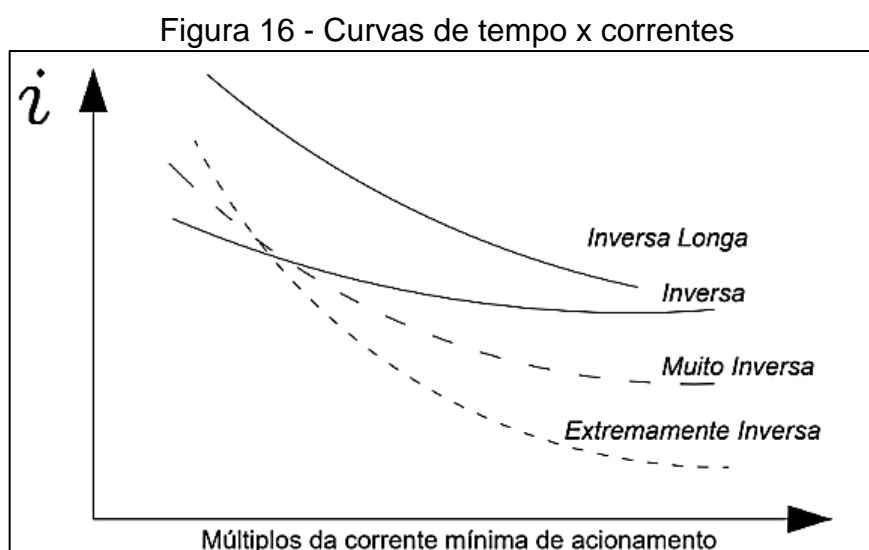
Mamede (2018 p.458) afirma que “os relés apresentam curvas características de temporização que os habilitam para determinados tipos de aplicação”.

A energia incidente é diretamente proporcional ao tempo de duração do arco elétrico, ou seja, reduzir o tempo de atuação dos dispositivos de proteção é também uma alternativa para reduzir os níveis de energia incidente.

3.5.1 Curvas dos relés

Os relés são ajustados para executar ações dependendo da intensidade das correntes em um determinado tempo, podendo assim ser expressas por equações, que didaticamente serão representadas pelas curvas, gráficos de corrente em função do tempo.

Na figura 16 estão representadas as curvas extremamente inversas, inversa, muito inversa, inversa longa. Outras como a de tempo definidos estão disponíveis em grande parte de relés de proteção. Alguns relés digitais disponibilizam uma seção para o usuário implementar curvas que melhor lhe atenda para as diversas condições de proteção. Mamede (2018 p.458) afirma que, “os relés apresentam curvas características de temporização que os habilitam para determinados tipos de aplicação”.



Fonte: Mamede (2018)

3.5.2 Seletividade de operação

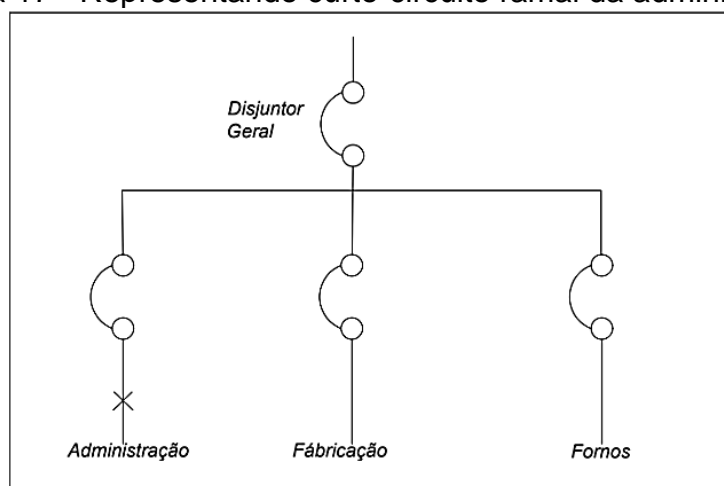
Seletividade significa isolar, tão depressa quanto possível, a parte do sistema afetada pela falta, e deixar todas as demais energizadas, garantindo a confiabilidade e continuidade no sistema elétrico em questão.

O objetivo do estudo de seletividade é determinar os parâmetros de ajustes dos relés e dispositivos de proteção, para que, quando acontecer uma falha atue somente os relés ou dispositivos a jusante mais adjacente a falha, retirando a menor parte do sistema elétrico, o mais rápido possível e assim garantindo a máxima segurança aos equipamentos e sistema.

Conforme Barros (2015 p.93), “a seletividade de um sistema de proteção é importante para fazer com que somente o dispositivo de proteção que esteja mais próximo a montante a anomalia atue”. Para isto existem várias técnicas e metodologias de proteção a fim de atender às diversas condições que o sistema elétrico está submetido, levando sempre em consideração a segurança das pessoas, integridade dos equipamentos e permanência do fornecimento de energia aos usuários que não estão em falhas.

Analisando a figura 17, é possível identificar, o normal para operação seria o desligamento do disjuntor da administração, local de ocorrência da anomalia, mas, pode ocorrer o desligamento do disjuntor geral representando uma falha de operação. Neste caso, Barros (2015 p.93) afirma que “a seletividade da proteção não está correta, pois o desligamento do disjuntor geral iria desabastecer de energia elétrica, dos circuitos da fábrica e dos fornos”. Para FILHO e Mamede (2017 p.32), “a seletividade é a característica que um sistema de proteção deve ter para que, ao ser submetido a correntes anormais, faça atuar os dispositivos de proteção de maneira a seccionar somente a parte do circuito afetado”.

Figura 17 - Representando curto-circuito ramal da administração



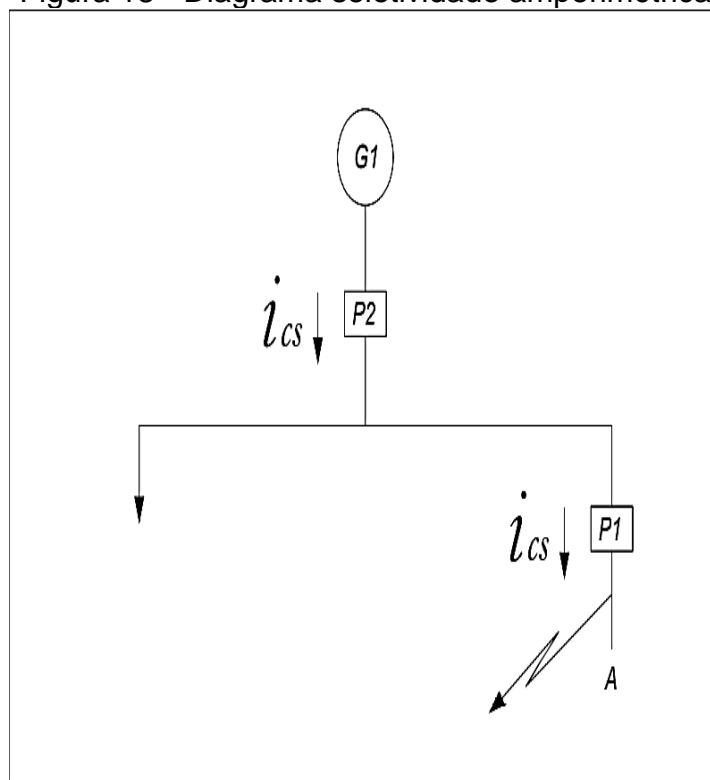
Fonte: Barros (2015)

3.5.3 Seletividade amperimétrica

Filho e Mamede (2017 p.33) descrevem como sendo uma “seletividade que se orienta pela corrente da falta, baseada no princípio de que a corrente de curto circuito aumenta à medida que o ponto de defeito se aproxima da fonte.” A seletividade amperimétrica baseia-se, exclusivamente, no crescimento da corrente, quanto mais perto da fonte maior serão as correntes, assim maiores serão os valores destes parâmetros de proteção.

A figura 18 mostra uma falta no ponto A tomando como referência uma proteção amperimétrica, o ajuste do disjuntor P1, devendo ser menor que o disjuntor P2. Filho e Mamede (2017 p.34) diz que, “ $IP1 \leq 0,8 Ics$ ”, sabendo que a corrente Ics passa pelos dois dispositivos, P1 estando com menor valor ajustado, atuara primeiro.

Figura 18 - Diagrama seletividade amperimétrica

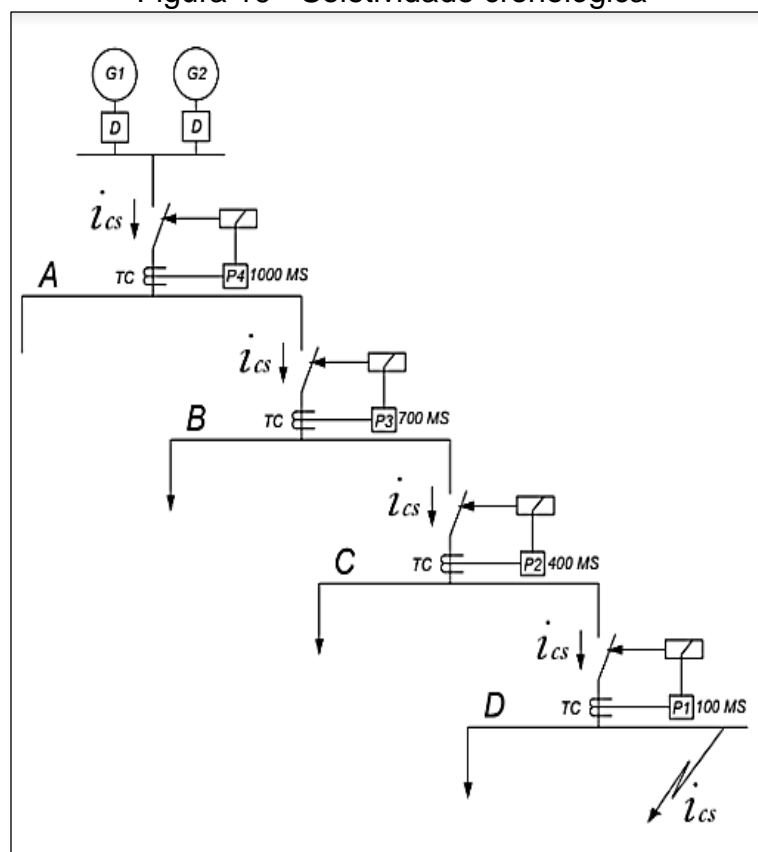


Fonte: FILHO e Mamede (2017 p.34)

3.5.4 Seletividade Cronométrica

Sugestivamente o nome desta proteção indica sua atuação baseada em tempos definidos para atuação, ou seja, quanto mais perto da fonte maiores serão os tempos, dando assim condição aos de menores valores atuarem nos dispositivos de menores valores e ajustes, eliminando a falta. FILHO e Mamede (2017 p.35) afirma que a “seletividade se fundamenta no princípio de que a temporização intencional do dispositivo de proteção próximo ao ponto de defeito deve ser inferior à temporização intencional do dispositivo de proteção a montante”. Levando em consideração que o relé envia comando para um dispositivo desligar, aplica-se este tempo ao estudo de coordenação, para FILHO e Mamede (2017 p.35), “essa diferença, denominada intervalo de coordenação, é assumida com valores entre 200 e 400 ms”. Para melhor entender esse conceito, a figura 19 admite um intervalo de coordenação de 300 ms.

Figura 19 - Seletividade cronológica



Fonte: Filho e Mamede (2017)

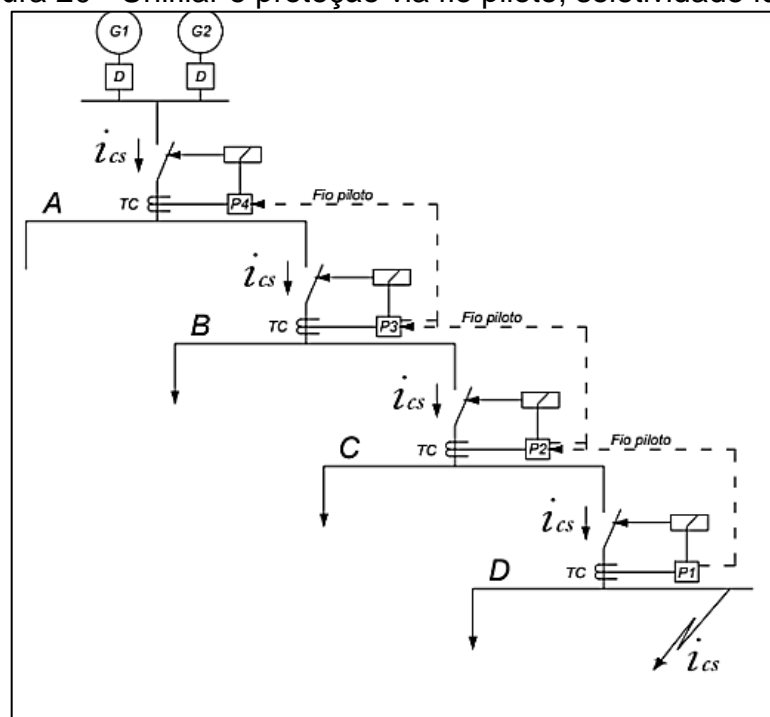
3.5.5 Seletividade lógica

É a seletividade baseada em combinações de ajuste de proteção com uma comunicação entre os dispositivos de proteção, comumente aplicado nos novos arranjos de proteção.

Filho e Mamede (2017 p.36) descreve que “a seletividade lógica é um sistema lógico que combina um esquema de proteção de sobrecorrente com um esquema de comunicação utilizando fio piloto ou outro meio equivalente de forma a obter uma proteção com intervalos de tempo extremamente reduzidos, porém seletivos”.

Para entender melhor o princípio da seletividade lógica, a figura 20 exemplifica uma falha acontecendo na barra D protegida pelo relé P1, que diante da ocorrência de uma falha ele detecta e envia um bloqueio lógico para o relé a montante P2, que recebendo o bloqueio o enviará para o relé montante P3, que por sua vez enviará bloqueio para P4, permitindo assim que P1 atue e elimine a falta.

Figura 20 - Unifilar e proteção via fio piloto, seletividade lógica



Fonte: Filho e Mamede (2017)

3.5.6 Perda de seletividade

Resende (2016) descreve que, 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. Resende (2016), ainda informa que, 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.

Santos e *tal*(2016), afirma que, a quantidade de energia a que um trabalhador pode estar exposto está relacionada diretamente a corrente de curto-circuito pelo tempo ($I^2 \cdot t$), sendo que a única variável que pode ser facilmente controlada é o tempo de atuação do sistema de proteção, definido pelo estudo de seletividade, e que sofrerá alteração em sua unidade instantânea, fazendo com que a energia incidente diminua com um tempo menor.

O tempo de atuação dos relés de sobrecorrente somado ao tempo de abertura dos disjuntores pode ainda sim ser muito alto, devido a isso se utiliza os sensores de arco elétrico, sendo em sua maioria fotossensíveis atuando com uma intensidade luminosa extremamente elevada. Normalmente, estes dispositivos permitem configurações para atuarem somente por luz, ou por luz e corrente, realizando o trip no disjuntor somente quando ambos os ajustes ultrapassam os valores pré-estabelecidos.

3.6 Coordenograma

O coordenograma é um gráfico que representa os dispositivos de proteção em função do tempo (eixo y) e da corrente (eixo x) em escala log x log; e são fornecidos por seus fabricantes. Com esse gráfico é possível analisar a coordenação entre os equipamentos de proteção existentes no sistema elétrico.

Em alguns casos pode-se utilizar no lugar do valor da corrente no eixo X do coordenograma o conceito de múltiplo (M), que é a relação entre a corrente de curto-circuito (I_{cc}) pela corrente de *pick-up* do relé de proteção (I_p). E esse valor pode ser calculado pela equação 19.

$$M = \frac{I_{cc}}{I_p} \quad (19)$$

Em que:

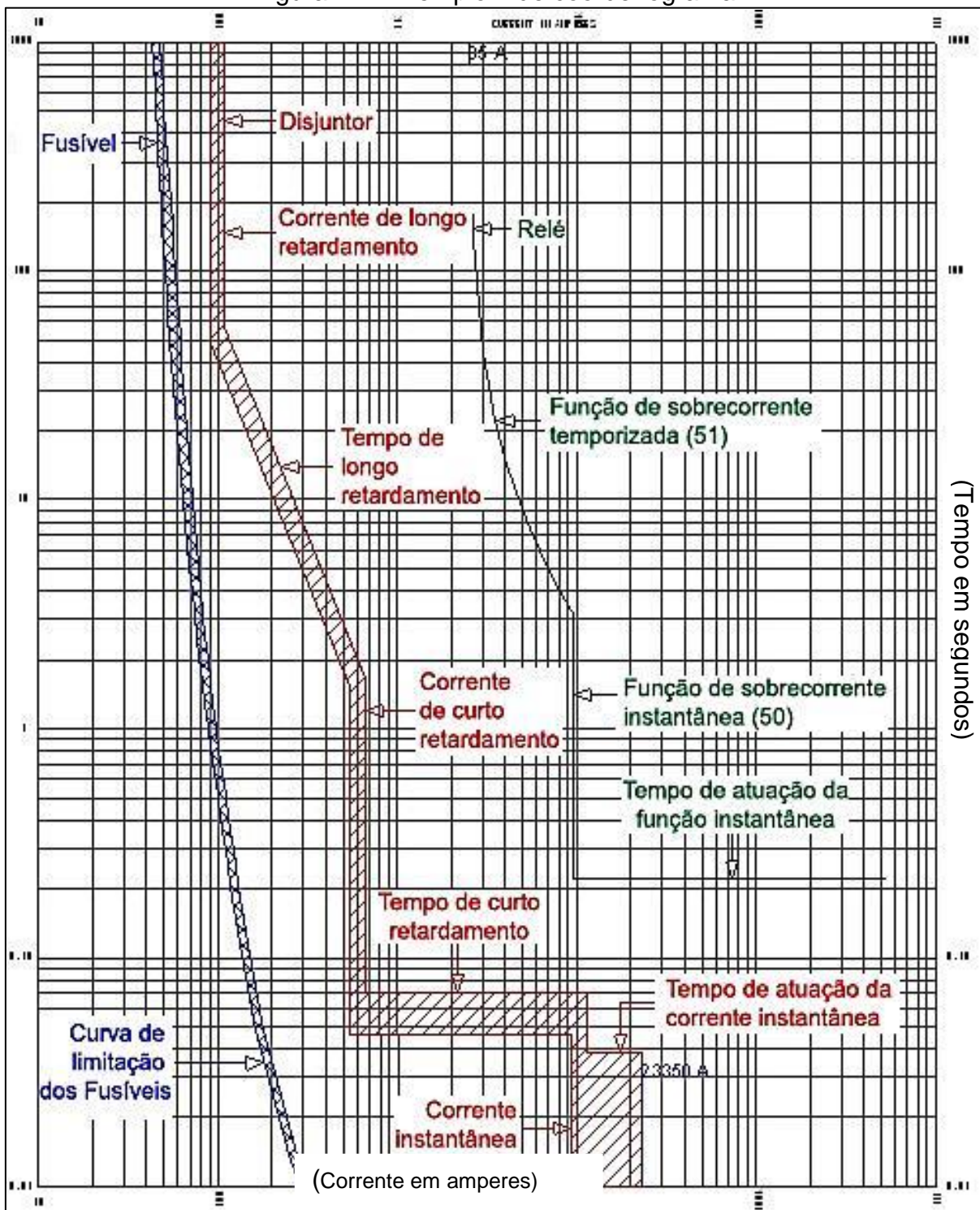
M = Múltiplo;

I_{cc} = Corrente de curto-circuito;

I_p = Corrente de pick-up do relé de proteção.

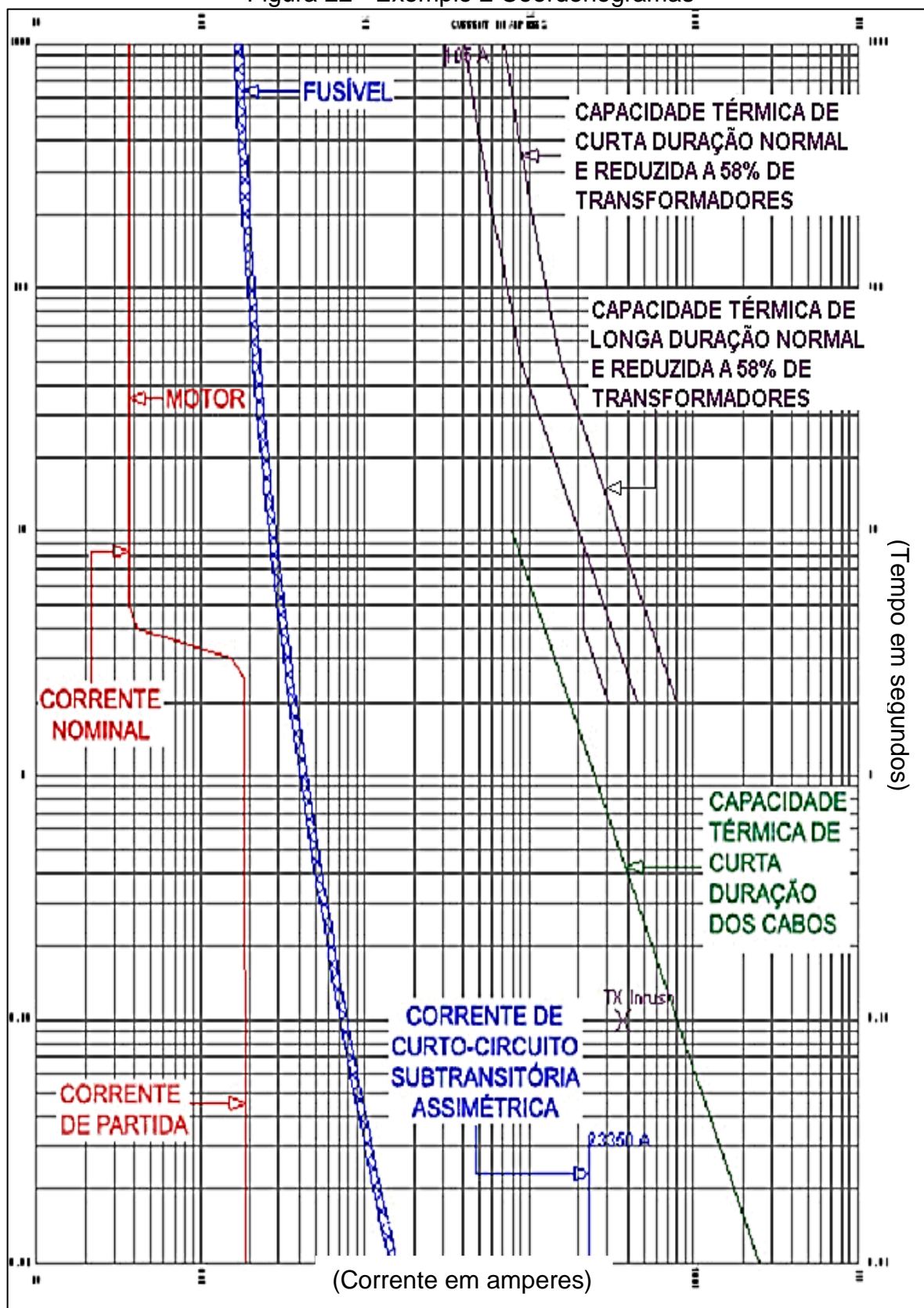
Nos coordenogramas são representadas as curvas dos dispositivos de proteção, curvas com os limites de suportabilidade de curta duração, pontos importantes (tempo e corrente) e as correntes de curto-circuito. As figuras (21) e (22) a seguir foram desenvolvidas pelos autores deste trabalho, utilizando software PTW, e indica as grandezas acima referidas.

Figura 21 - Exemplo 1 de coordenograma



Fonte: Do autor

Figura 22 - Exemplo 2 Coordenogramas



Fonte: Do autor

4 METODOLOGIA

O trabalho será realizado com base em uma pesquisa descritiva a fim de explicar as causas e efeitos da energia incidente, também expõe o método qualitativo a fim de mostrar gráficos e números relacionados a tema abordado, e formas de amenizar os impactos gerados pelo efeito do arco elétrico. Trata-se de um estudo de caso para realizar pesquisa em equipamento mostrando os benefícios gerados com a proposta do trabalho.

A metodologia de desenvolvimento deste trabalho é dividida em sete etapas:

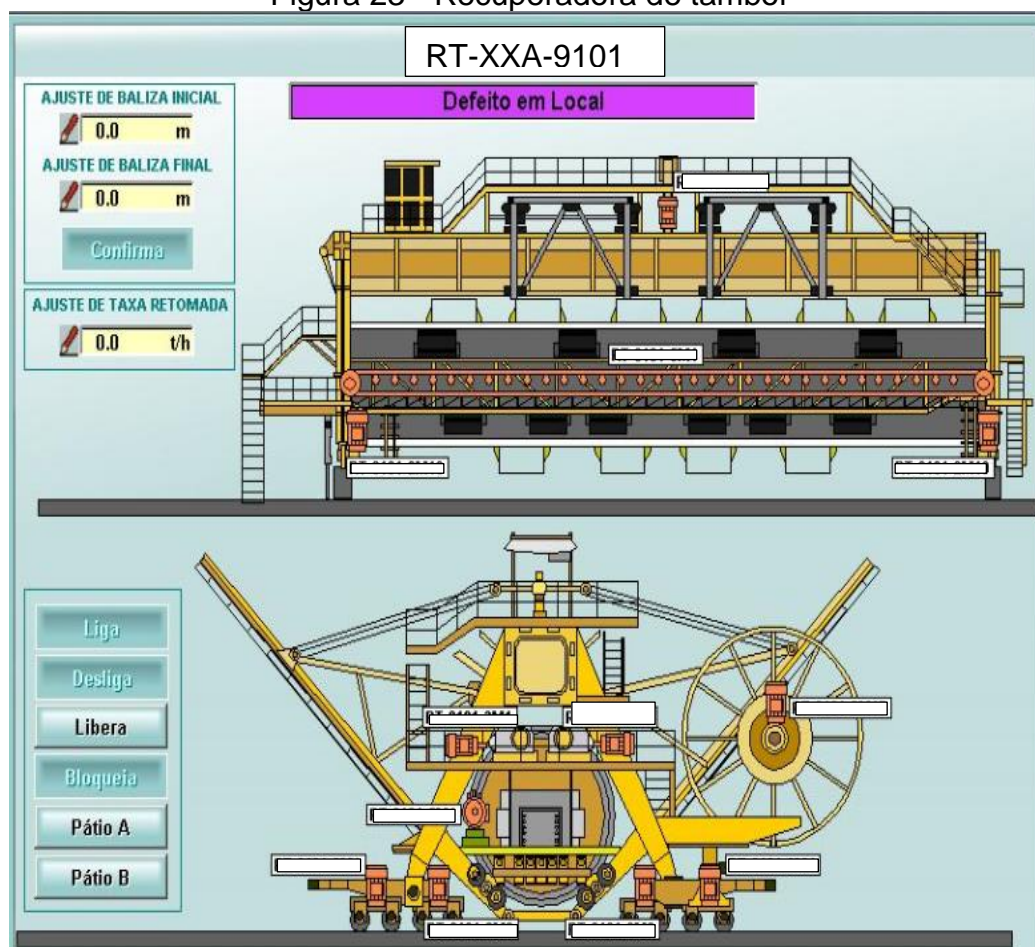
- a) Etapa 1: Realizar revisão bibliográfica do tema focando nos seguintes conceitos: curto-circuito, arco elétrico, relé de proteção, normas técnicas e métodos de calcular energia incidente;
- b) Etapa 2: Realizar o levantamento em campo na planta, com o objetivo de coletar todos os dados da instalação, cuja autorização já se encontra liberada;
- c) Etapa 3: Analisar os modos de operação do sistema elétrico, cujo projeto já se encontra liberado;
- d) Etapa 4: Extrair as correntes de curto-circuito no projeto de proteção da instalação em estudo;
- e) Etapa 5: Determinar a corrente do arco elétrico nos pontos de interesse;
- f) Etapa 6: Calcular energia incidente nos pontos de interesse da instalação, utilizando a metodologia da norma IEEE 1584b-2011;
- g) Etapa 7: Após conhecido os níveis de energia incidente, serão realizadas algumas propostas de modificação nos tempos de atuação da proteção para reduzir a energia incidente no momento de manobras, uma vez que tempo de atuação da proteção e os níveis de energia incidente são diretamente proporcionais.

5 ESTUDO DE CASO

O presente estudo baseou-se num sistema elétrico real de média e baixa tensão de uma recuperadora de tambor, responsável por retomar o minério de ferro empilhado no pátio de homogeneização. Este equipamento tem capacidade nominal de retomar 6 mil toneladas por hora em um pátio com 480 metros de comprimento.

A figura 23 mostra a recuperadora de tambor que está posicionada sobre trilhos e é movida por conjuntos de oito motores, acionados por inversores de frequência que proporcionam o controle de velocidade e posicionamento no pátio. O minério é guiado por um pequeno transportador do tipo correia que passa no centro do tambor, direcionando a um pequeno *shut*, este tem como função desviar para um transportador de correia, que tem o objetivo de alimentar a usina de concentração de minério de ferro.

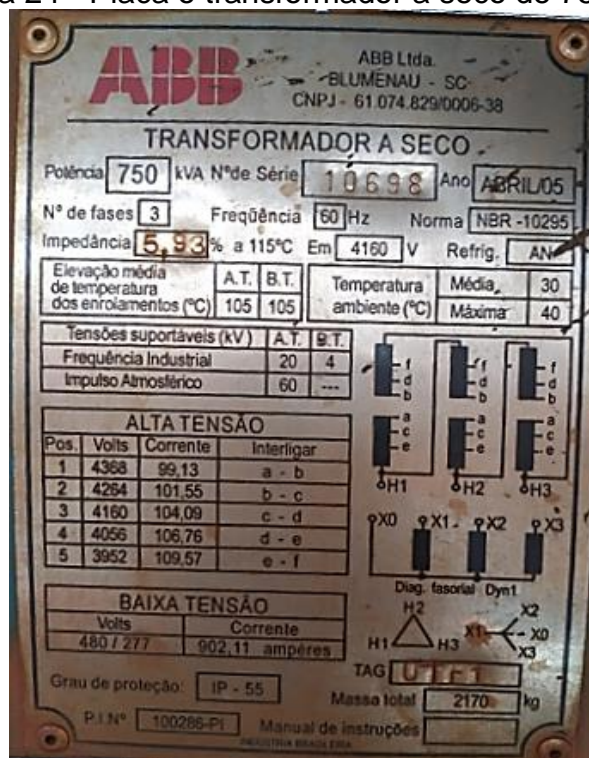
Figura 23 - Recuperadora de tambor



Fonte: Sistema de supervisório da mineradora

A recuperadora de tambor tem um transformador abaixador, tipo a seco de 750 kVA, trifásico, tensão de entrada e saída 4,160/0,48kV, fechamento em triângulo no primário e estrela aterrado no secundário, dados que estão na placa representado na figura 24. Suprindo o MC2-XXA-9101 de controle e acionamento da translação, giro do tambor, transportador de correia do tambor, compressores de ar, unidade hidráulica bem como os periféricos da máquina.

Figura 24 - Placa o transformador a seco de 750 KVA



Fonte: Do autor

A Subestação SE-XXA-01 alimenta a recuperadora de tambor com tensão de 4,160Volts, os quais são transmitidos por meio de três cabos trifolados de 95mm², e dois cabos tipo piloto de 16mm² para identificar rompimentos ou faltas a terra. Os cabos são enrolados em um grande carretel.

O pátio está dividido fisicamente em dois, um ao lado do outro, e entre eles existe uma empilhadeira de dupla lança com objetivo de formar as pilhas a ser retomada pela recuperadora de tambor. Quando a recuperadora de tambor está recuperando no pátio 1, a empilhadeira esta empilhando no pátio 2 e vice-versa.

O diagrama elétrico simplificado desta instalação pode ser visto na figura 25.

Diariamente nas subestações são realizadas várias intervenções de manutenção que têm grande potencial de causar um acidente envolvendo arco elétrico, tais como:

- Extração de gavetas em painéis energizados;
- Medições termográficas em painéis energizados;
- Manobra de disjuntores energizados;
- Medição em painéis energizados de baixa tensão (127,480V).

Todas as intervenções de manutenção realizadas dentro de subestações, são realizadas por operadores utilizando o EPI de nível quatro contra arco elétrico, conforme mostra a figura 26.

Figura 26 - EPI contra arco elétrico classe quatro



Fonte: Do autor

5.1 Levantamento de dados

Essa seção tem como objetivo mostrar todos os dados e informações coletados dos equipamentos em campo, e informações que foram extraídas da documentação cedida pela empresa.

Inicialmente, realizou-se um levantamento em campo de cada equipamento, e associado a que subestação o mesmo pertence, para os painéis e seus respectivos Tags, da planta em estudo e essas informações estão expressas na tabela 9. Estes

mesmos equipamentos estão indicados no diagrama unifilar simplificado no capítulo 5 deste trabalho.

Tabela 9 - Tags dos equipamentos das subestações

Subestação	Tag do Equipamento
SE-XYA-01	QD-XXA-02
SE-XYA-01	QD-XXA-02-6Q1
SE-XXA-01	QD-XXA-01
SE-XXA-01	MC-XXA-01
SE-XXA-01	MC1-XXA-9101
SE-XXA-01	MC2-XXA-9101

Fonte: Do autor

Além disso, realizou-se a coleta do tipo de equipamento e a tensão de linha para todo o sistema elétrico em estudo, com o objetivo de documentar o nível de tensão e sua classe, como pode ser visto na tabela 10. Pois desta forma permitirá encontrar as distâncias entre os condutores ou barramentos conforme a IEEE1584b-2011.

Tabela 10 - Nível de tensão e classe dos equipamentos

Subestação	Tag do equipamento	Tensão (KV)	Tipo de equipamento
SE-XYA-01	QD-XXA-02	13,8	Painel
SE-XYA-01	QD-XXA-02-6Q1	13,8	Painel
SE-XXA-01	QD-XXA-01	13,8	Painel
SE-XXA-01	MC-XXA--01	4,16	Painel
SE-XXA-01	MC1-XXA-9101	4,16	Painel
SE-XXA-01	MC2-XXA-9101	0,48	CCM

Fonte: Do autor

O tipo de instalação dos equipamentos pode ser classificado como aberto para instalações ao ar livre ou fechado para painéis, CCMs, barramentos e canaletas. Porém, todos os equipamentos instalados e envolvidos nesse estudo são do tipo fechado.

Já os aterramentos destes equipamentos em estudo são do tipo direto solidamente aterrado ou do tipo indireto por meio de reator, isolado ou de alta resistência. Através do diagrama unifilar da instalação foi possível coletar as informações sobre o tipo de aterramento dos equipamentos, como mostra na tabela 9.

Tabela 11 - Tipo do aterramento

Subestação	Tag do equipamento	Tipo do aterramento
SE-XYA-01	QD-XXA-02	Alta resistência
SE-XYA-01	QD-XXA-02-6Q1	Alta resistência
SE-XXA-01	QD-XXA-01	Alta resistência
SE-XXA-01	MC-XXA-01	Alta resistência
SE-XXA-01	MC1-XXA-9101	Alta resistência
SE-XXA-01	MC2-XXA-9101	Alta resistência

Fonte: Do autor

O conhecimento das correntes de curto-circuito é muito importante para a determinação dos níveis de energia incidente. O estudo de curto-circuito serve como documento de referência para o estudo de coordenação e seletividade.

A empresa possui estudo de coordenação e seletividade para todo seu sistema elétrico de potência. No qual foi possível coletar os valores das correntes de curto-circuito sólidas nos pontos de interesse. Por esse motivo, os seus cálculos não se fazem necessários neste trabalho. na tabela 12 pode ser visto os valores da corrente de curto-circuito em cada barra.

Tabela 12 - Corrente de curto-circuito de cada equipamento

Subestação	Tag do equipamento	Corrente de curto-circuito (kA)
SE-XYA-01	QD-XXA-02	18,31
SE-XYA-01	QD-XXA-02-6Q1	49,78
SE-XXA-01	QD-XXA-01	11,11
SE-XXA-01	MC-XXA-01	11,89
SE-XXA-01	MC1-XXA-9101	12,77
SE-XXA-01	MC2-XXA-9101	17,23

Fonte: Do autor

Com o objetivo de conhecer a potência instalada na retomadora de tambor realizou-se a coleta de todos os dados técnicos dos equipamentos instalados, conforme mostra a tabela 13.

Tabela 13 - Descrição dos equipamentos instalados na RT-XXA-9101

Tag	Fabricante	Potência (KW)	Nº Polos	Corrente (A)	Tensão (V)	Quantidade	Potência total (KW)
RT-XXA-9101 Translação	WEG	11	6	19	440	8	88
RT-XXA-9101 UH Ancinho	WEG	180	6	295	440	2	360
RT-XXA-9101 Giro Tambor	WEG	200	6	249	440	2	400
RT-XXA-9101 TC interna	WEG	147	6	182	440	1	147
RT-XXA-9101 Tr. Calor	WEG	5,5	4	9,5	440	2	11
RT-XXA-9101 Enr. cabos	SEW	7,5	4	13,9	440	1	7,5
RT-XXA-9101 Ancinho	WEG	7,5	4	12,5	440	4	30
RT-XXA-9101 Lubrificação	WEG	0,37	4	0,9	440	2	0,72
Total geral							1044

Fonte: Do autor

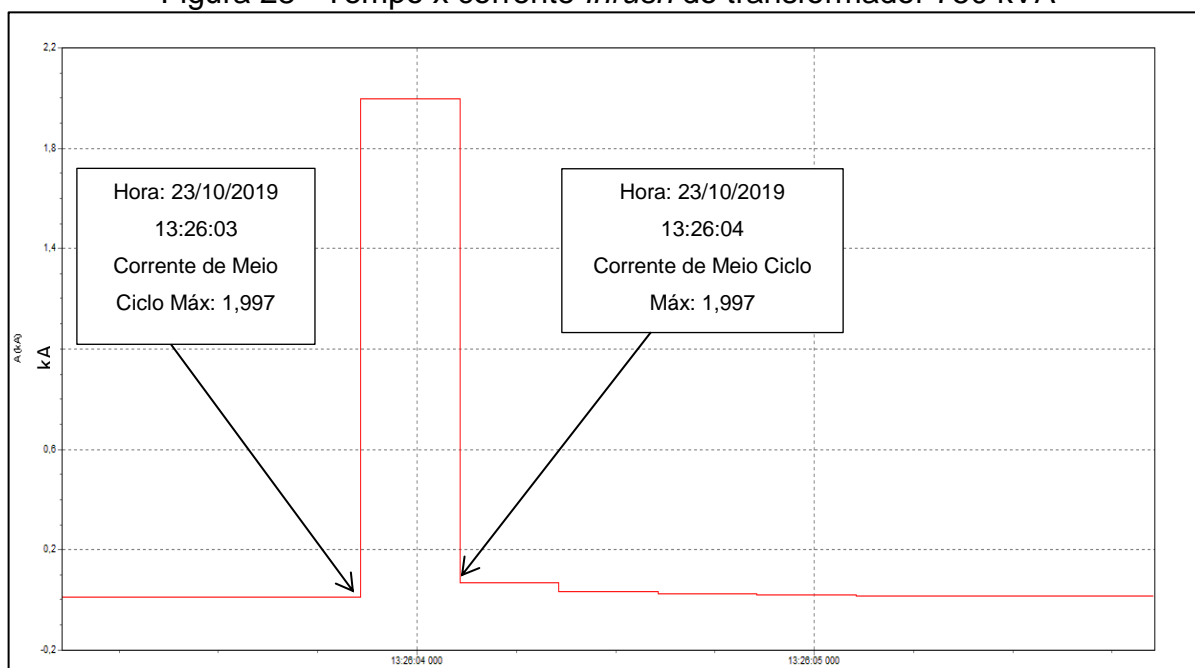
Com o objetivo de conhecer o valor da corrente *Inrush* do transformador 750 kVa que alimenta todo sistema de potência da retomadora, realizou-se o desligamento e em seguida foi instalado um medidor de qualidade de energia da Fluke modelo 435, com a finalidade de registrar esse transitório no enrolamento primário do transformador. A figura 27 mostra o medidor utilizado para registrar esse evento.

Figura 27- Medidor de energia 435 da Fluk



Fonte: Do autor

Após a instalação do medidor de qualidade de energia, realizou-se a energização do transformador para realizar a coleta desse evento. Realizou se três medições com o objetivo de comparar os resultados. A figura 28 mostra resultado da medição.

Figura 28 - Tempo x corrente *Inrush* do transformador 750 kVA

Fonte: Do autor

Como pode ser observado na curva representada pela linha vermelha, o tempo de duração do transitório da corrente *Inrush* é aproximadamente 100 milissegundos e o pico máximo da corrente de meio ciclo é de 1,99 kA.

5.2 Estudo de coordenação e seletividade

Os coordenogramas foram simulados no software PTW de propriedade da SKM. Para realizar a simulação foi considerado o sistema operando em condições normais, ou seja, em condição de operação radial, o que determina os transformadores TF-XXA-01, TF-XXA-02 e TF-XXA-03 trabalhando isoladamente e os disjuntores de interligação de 13,8 KV abertos.

O estudo de coordenação e seletividade da RT-XXA-9101 apresenta o coordenograma de proteção do MC1-XXA-910, onde está acondicionado o disjuntor que alimenta o primário do transformador da RT-XXA-9101, também neste mesmo coordenograma está representada a curva DJ-XXA-01-003 que protege MC2-XXA-9101 no secundário do mesmo transformador. Em cada um deles é importante se obter as curvas dos dispositivos de proteção, uma vez que serão obtidos os resultados para calcular a energia incidente.

Será apresentado os ajustes do RL-XXA-01-018 de proteção para a barra de 4,16 kV na figura 29 no cenário atual.

Figura 29 - Ajuste dos parâmetros do RL-XXA-01-018

Segment	Setting1	Setting2
1 51P Pickup	4.2	
2 ANSI Ext. Inv	19	1
3 50P Pickup	17	
4 50P Delay	0.22	
5 50P Pickup	65	

Fonte: Do autor

Na figura 30 pode ser visto os ajustes do DJ-XXA-01-003 de proteção para a barra de 0,48 kV também no cenário atual. Este disjuntor tem uma capacidade nominal de carga de 1250A, devido ao o ajuste *long time* (tempo grande) estar 0,98, a corrente nominal de carga passa a ter um valor nominal de 1225A para proteção de sobrecarga (L). E para a função *short time* (tempo curto), o mesmo está ajustado para 3 vezes o valor da corrente ajustada em *longe time*, para um tempo de 0,1s na curto-circuito temporizado (S). A função curto-circuito instantâneo (I) está desabilitada (off).

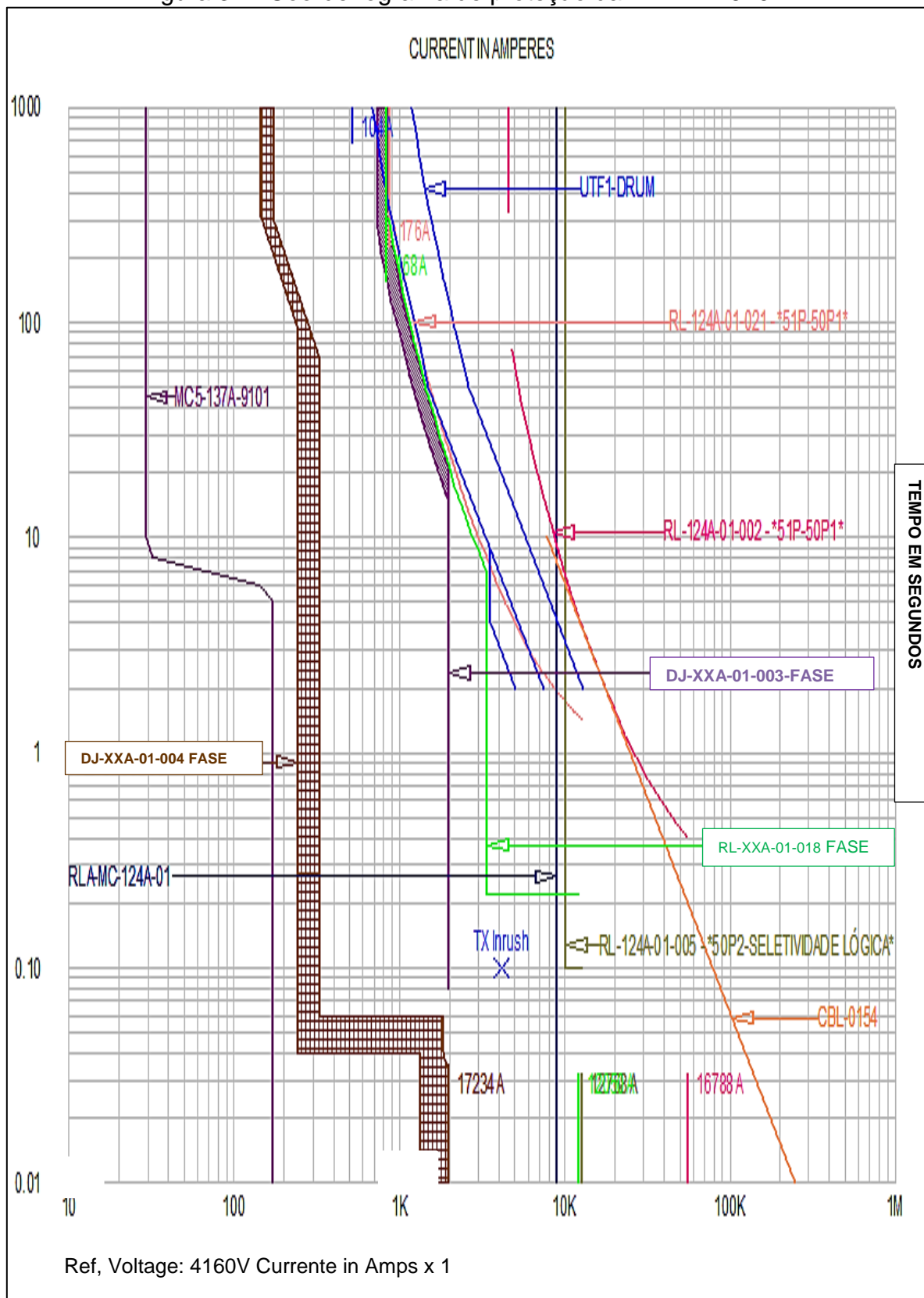
Figura 30 - Ajuste dos parâmetros do DJ-XXA-01-003



Fonte: Do autor.

Já a figura 31 representa o coordenograma desenvolvido pelos autores através do mesmo software, com objetivo analisar a coordenação e seletividade dos dispositivos do sistema de proteção do equipamento em estudo.

Figura 31 - Coordenograma de proteção da RT-XXA-9101



Existe a probabilidade da ocorrência de curto-circuito com arco elétrico nas garras do equipamento de manobra (disjuntor) da coluna/cubículo de entrada de um conjunto, ou ainda, nos cabos ou barramento contidos nessa coluna, na região compreendida entre o secundário do transformador e a entrada do referido conjunto. Nessas condições, a proteção responsável pela eliminação da falta é a proteção a montante, ou seja, a proteção do primário do transformador. Nestes casos, o tempo de atuação será maior, pelo parâmetro da função 51 (temporizada), tendo em vista a coordenação das proteções, acarretando um aumento da energia incidente neste ponto.

Caso ocorra uma corrente de curto-circuito na ordem de 7,93 KA, é possível obter o tempo de atuação da proteção do transformador, a partir da curva identificada pela cor verde no coordenograma acima. Esta curva representa o tempo de resposta do relé RL-124A-01-018, que tem a função de garantir a proteção do transformador trifásico de 750 KVA responsável pela alimentação da barra de 0,48 kV do MC2-XXA-9101.

Conclui-se então, que o tempo de atuação da proteção foi baseado no estudo de seletividade que é 220ms, sendo acrescidos 83ms, que é o tempo de abertura dos contatos do disjuntor de média tensão. Com base nestas informações o tempo total de eliminação para uma falha de arco elétrico de é de 0,303ms para situação atual.

5.3 Cálculo da energia incidente de arco elétrico

Para a realização do cálculo da energia incidente de arco elétrico, os autores deste trabalho utilizaram o mesmo *software* já citado anteriormente, que utiliza a metodologia IEEE 1584b-2011 para calcular a energia incidente de arco elétrico conforme seção 4.4 deste trabalho. Após a realização da coleta dos dados em campo, é possível realizar os cálculos. Na figura 32 destacado em vermelho é possível visualizar a configuração da metodologia.

Figura 32 - Especificação da norma utilizada

Fonte: Do autor

Após a configuração e inserção de todos os parâmetros necessários, o estudo é modelado no *software* PTW. O resultado desse estudo gerou uma planilha mostrando em suas colunas informações importantes como, tag do barramento onde foi aplicada a falta, tempo de atuação do dispositivo de proteção, energia incidente em cada barra, distância segura de aproximação do arco elétrico, tensão de alimentação da barra, corrente de curto-circuito e de arco e o dispositivo de proteção principal da barra. Posteriormente essas informações serão analisadas.

O critério para a análise dos resultados, foi estabelecido um nível de energia incidente de arco elétrico máxima permitida de 8 cal/cm². O motivo de adotar esse critério foi devido aos EPIs que a planta possui hoje, que é do risco 2 (10 cal/cm²) e do risco 4 (40 cal/cm²). Através de teste em laboratório o fabricante do EPI relata que se uma pessoa utilizando um EPI do tipo risco 2 (10 cal/cm²) exposto a uma energia incidente de arco elétrico de 10 cal/cm², poderá sofrer queimaduras de 2º grau. Então para garantir uma proteção de 100% do operador, optou-se por sobre dimensionar o EPI em 20% acima do valor adotado como critério.

Conclui-se então que, para uma energia incidente de arco elétrico acima de 8 cal/cm² é necessário a utilização do EPI do nível 4 (40 cal/cm²) até mesmo para

acessar o interior da subestação do equipamento em estudo. Porém a utilização desse tipo de EPI torna-se ergonomicamente desconfortável para o uso contínuo.

Na figura 33 está destacado em vermelho o local onde o nível de energia incidente por arco elétrico excede o valor estabelecido pela empresa. Por esses motivos, o objetivo deste trabalho será reduzir a energia incidente de arco elétrico na entrada do DJ-137A-01-003 que apresenta um valor de 37,5 % acima do valor adotado como critério.

Figura 33 - Resultado gerado pelo cálculo da energia incidente modelado no PTW

Bus Name	Protective Device Name	Bus kV	Bus Bolted Fault (kA)	Bus Arcing Fault (kA)	Prot.Dev Bolted Fault (kA)	Prot.Dev Arcing Fault (kA)	Trip/Delay Time (sec.)	Breaker Opening Time/Tol (sec.)	Ground	Equip Type	Gap (mm)	Arc Flash Boundary (m)	Working Distance (m)	Incident Energy (cal/cm ²)
MC1-XXA-9101	RL-XXA-01-021 (*50P2-SELE TIVIDADE LÓGICA*)	4.16	12.05	11.66	11.67	11.29	0.4	0.080	No	SWG	104	4.58	0.91	5.7
MC2-XXA-9101	DJ-XXA-01-003 (FASE)	0.48	17.23	10.44	13.09	7.93	0.14	0.000	No	PNL	25	1.15	0.46	5.4
MC2-XXA-9101 (DJ-XXA-01-003 LineSide)	RL-XXA-01-018 (FASE)	0.48	17.23	10.44	13.09	7.93	0.22	0.080	No	PNL	25	1.76	0.46	11

Fonte: Do autor

5.4 Análise dos resultados e propostas de mitigação do risco de arco elétrico

Com o estudo realizado e apresentado no item 5.3 deste trabalho, é possível analisar o painel que apresenta maior nível de energia incidente. Através da figura 33 é possível analisar os resultados do estudo. Verifica-se que na entrada do DJ-137A-01-003 que alimenta a barra de 0,48kV do MC2-137A910, o nível de energia incidente é maior que 8 cal/cm². É possível também obter a corrente de curto-circuito daquele barramento e o tempo duração que a proteção leva para detectar a falta, pois essas duas variáveis influenciam diretamente na quantidade de energia incidente caso ocorra um arco elétrico.

Uma vez determinado o ponto crítico, torna-se necessário medidas de mitigação do risco de arco elétrico a qual os operadores estão expostos, para a redução dos riscos de energia incidente de arco elétrico.

Uma medida que pode ser adotada é a redução do tempo de atuação das proteções dos equipamentos. Porém esta medida poderá promover descoordenação entre os dispositivos de proteção a jusante, caso ocorra um curto-circuito, outra estratégia é a redução da corrente de curto-circuito que seria um trabalho com uma complexidade mais alta, devido ter interferência em vários pontos do sistema.

A redução do tempo dos dispositivos de proteção pode ser feita através de alterações dos ajustes dos relés e disjuntores. Ao reduzir tempo de atuação dos dispositivos de proteção, a curva tempo x corrente pode ser deslocada para a esquerda e pode alcançar a corrente nominal de carga, impossibilitando a planta de operar em condições normais de operação. Desta forma a proteção do sistema não estrara cumprindo com sua função, que é atuar para faltas e não para condições normais de operação.

A troca de fusíveis por relés também pode ser uma solução atraente e viável, pois os relés proporcionam curvas bem mais ajustáveis e flexíveis, uma vez que os relés oferecem vários ajustes e podem atender vários objetivos ao mesmo tempo, como exemplo, redução do tempo de atuação, proteção, coordenação e seletividade.

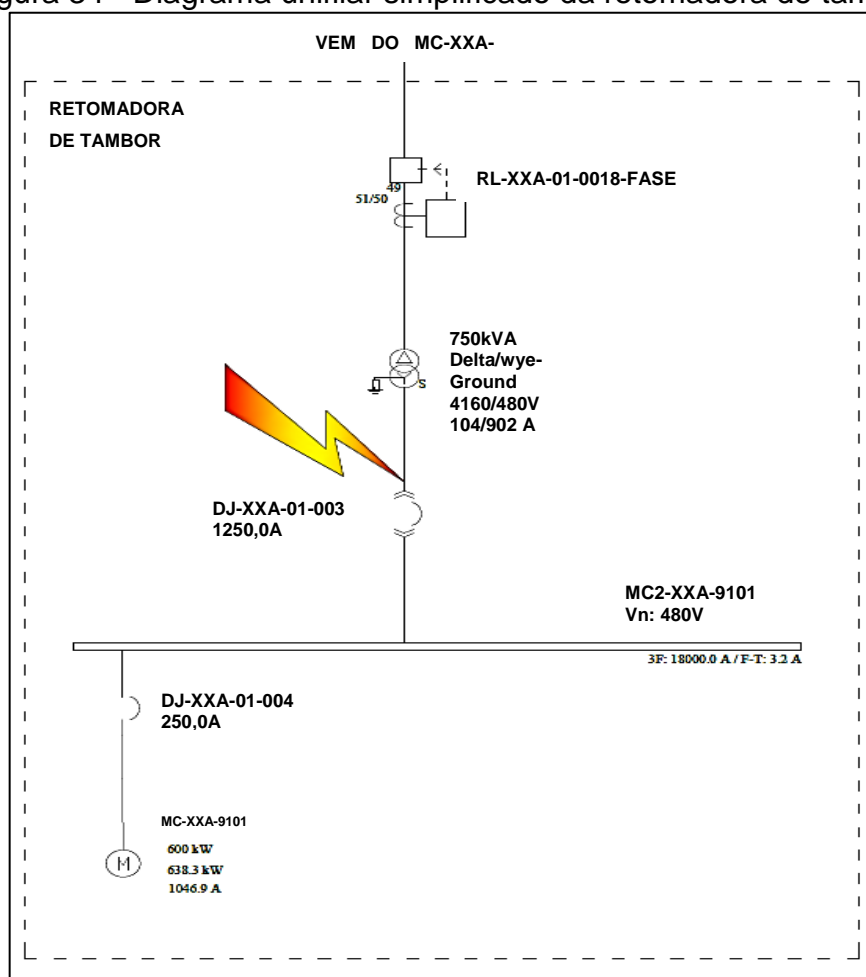
E quando não há mais nada o que fazer se tratando de ajustes das proteções, para minimizar a energia incidente de arco elétrico, outra solução que deve ser deixada em último caso, é a instalação de comandos para acionamentos remotos, pois apresenta uma vantagem muito grande por não apresentar riscos aos operadores, mesmo que a energia incidente de arco elétrico tenha valores elevados, devido os mesmos operarem os equipamentos a um distância segura da região de exposição da energia incidente de arco elétrico.

Na próxima Seção, no ponto em que a energia incidente foi considerada acima do critério definido (anunciada na seção 5.3), a mesma será analisada e uma proposta de solução será indicada, com objetivo de redução do seu valor.

5.4.1 DJ-XXA-01-003 de alimentação da barra 480V do MC2-XXA-9101

O MC2-XXA-9101 apresentou energia incidente de arco elétrico acima do valor adotado como critério para a análise no *line side* (lado da linha) do DJ-XXA-01-003 de entrada desse mesmo MC. A energia incidente de arco elétrico exposta foi de 11 cal/cm², valor bem acima da energia incidente de arco elétrico máxima adotada como critério que é 8 cal/cm². Devido ser a montante do DJ-XXA-01-003 de entrada da barra de 0,48 kV, que por sua vez não isolara a falta. Desta forma quem irá atuar em uma falta na entrada do referido disjuntor é a proteção do sistema de média tensão, que é comandado pelo relé de fase RL-XXA-01-0018. A figura 34 a seguir mostra o diagrama unifilar simplificado da SE da recuperadora de caçamba, e destacado em vermelho o ponto onde o valor da energia incidente pode atingir o valor de 11 cal/cm² caso ocorra uma falta com arco elétrico.

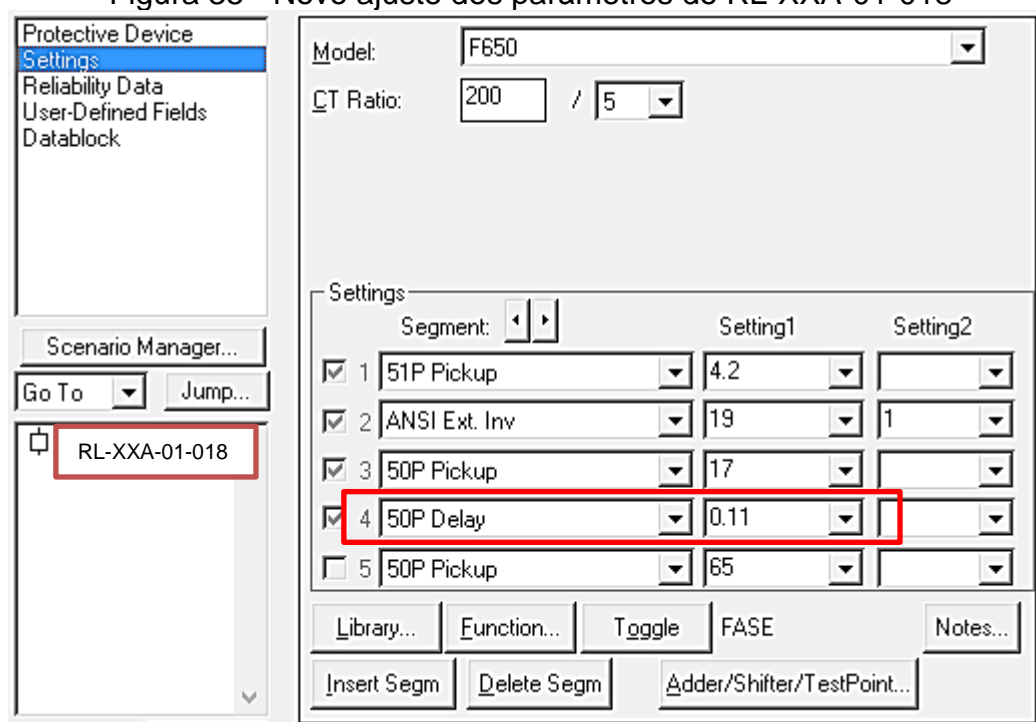
Figura 34 - Diagrama unifilar simplificado da retomadora de tambor



Fonte: Do autor

Com o objetivo de reduzir o tempo de atuação do RL-XXA-01-018 para uma falta, realizou-se a mudança do tempo da função 50 de fase que antes era de 220 milissegundos, e com o novo parâmetro foi alterada para 110 milissegundos, como mostra a afigura 35.

Figura 35 - Novo ajuste dos parâmetros do RL-XXA-01-018



Fonte: Do autor

A decisão de mudar esse tempo foi baseada com as informações extraídas da figura 28, que é o resultado de uma das medições realizada em campo com instrumento dedicado para registrar o tempo e o valor exato da corrente *Inrush* do transformador onde o RL-XXA-01-018 tem a função de proteger. Essa solução será muito vantajosa para o sistema, pois o tempo em que o dispositivo de proteção irá levar para eliminar a falta será muito menor.

Para dar início a tal análise, é necessário obter corrente de arco, o tempo de atuação dos dispositivos de proteção, o valor da energia incidente, distância segura de aproximação do arco elétrico. Com a utilização do software PTW foi possível modelar um novo estudo para obter todas essas informações mencionadas acima, e o resultado pode ser visto na figura 36.

Figura 36 - Resultado gerado pelo cálculo da energia incidente modelado no PTW após novo ajuste

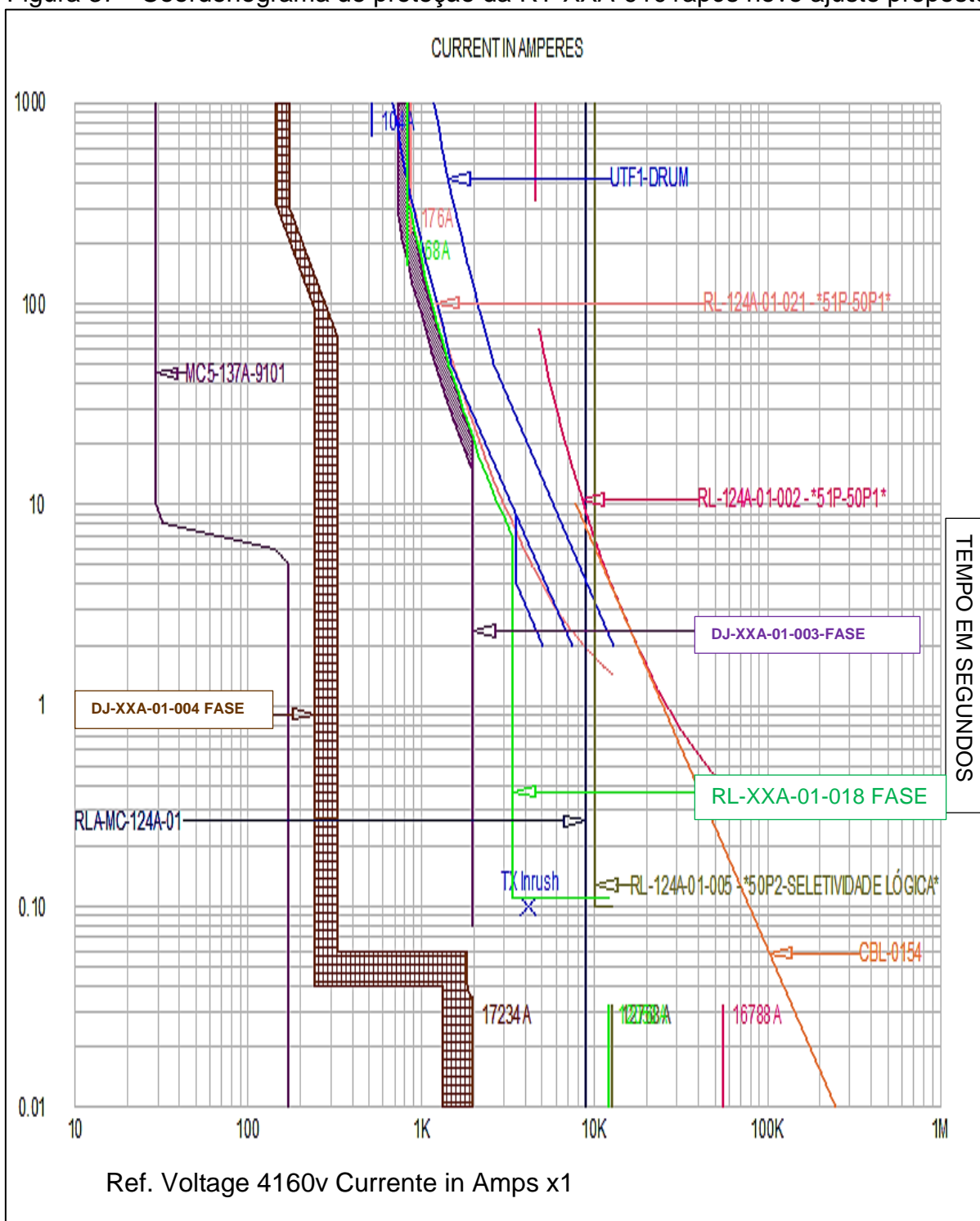
Bus Name	Protective Device Name	Bus kV	Bolted Fault (kA)	Arcing Fault (kA)	Bolted Fault (kA)	Arcing Fault (kA)	Delay Time (sec.)	Opening Time/Tol (sec.)	Ground	Equip Type	Gap (mm)	Boundary (m)	Distance (m)	Energy (cal/cm ²)
MC1-XXA-9101	RL-XXA-01-02 1 (*50P2-SELETIVIDADE LÓGICA*)	4.18	12.05	11.88	11.87	11.29	0.4	0.080	No	SWG	104	4.58	0.91	5.7
MC2-XXA-9101	DJ-XXA-01-00 3 (FASE)	0.48	17.23	10.44	13.09	7.93	0.14	0.000	No	PNL	25	1.15	0.48	5.4
MC2-XXA-9101 (DJ-XXA-01-003 LineSide)	RL-XXA-01-01 8 (FASE)	0.48	17.23	10.44	13.09	7.93	0.11	0.080	No	PNL	25	1.37	0.48	7.3

Fonte: Do autor

Após a alteração do ajuste da função 50 de fase do RL-XXA-01-018 para 110 ms é possível visualizar na figura 36, que a recomendação proposta atende a premissa de reduzir o valor da energia incidente na entrada do DJ-XXA-01-003 que alimenta o MC2-XXA-9101 para um valor abaixo de 8 cal/cm², que foi o valor adotado como critério.

Após conhecer esses valores, é possível analisar as curvas de tempo X corrente dos dispositivos de proteção. Para gerar o coordenograma com as curvas, os dispositivos de proteção de interesse são selecionados, gerando um novo TCC (*Time Current Curve*), como pode ser visto na figura 37.

Figura 37 - Coordenograma de proteção da RT-XXA-9101 após novo ajuste proposto



Fonte: Do autor

Como pode ser visto, a tensão base que está configurada para esse coordenograma é de 4160V, devido a curva ser analisada na cor verde que é da proteção do primário do transformador 4160/480V de alimentação da retomadora de tambor.

Ao analisar a curva do RL-XXA-01-018 após o novo ajuste da função 50 de fase, deve atentar para a corrente *inrush* desse transformador. Pois o dispositivo de proteção deverá permitir a passagem de uma corrente com amplitude pelo seu tempo de duração. Desta forma ele não poderá atuar em um tempo menor ou igual a corrente *Inrush* para o valor que corresponde a seu tempo e amplitude. O ponto *inrush* deste transformador é indicado com uma marcação de um X na cor azul, que é a cor usada para a curva do transformador. Observa-se que o ajuste proposto do tempo da função 50 de fase do RL-XXA-01-018, está atendendo ao requisito mencionado.

Como pode ser observado, a curva do RL-XXA-01-018 está acima do ponto *inrush* do referido transformador que o relé está protegendo. Portanto, com esse novo ajuste o relé de fase não impedirá o transformador de ser energizado. Porém, com este novo ajuste, dependendo da amplitude da corrente de curto-circuito na barra de 0,48V essa corrente pode ser refletida no primário do transformador, fazendo com que o RL-XXA-01-018 atue primeiro para uma falha no 0,48V. Mas essa descoordenação entre o RL-XXA-01-018 e o DJ-XXA-01-003 não impactará no funcionamento da máquina, pois o transformador é um alimentador exclusivo da máquina, ou seja não alimenta outras cargas a não ser a da própria máquina.

Conclui-se então que, com o novo ajuste proposto para função 50 de fase do RL-XXA-01-018 que o tempo de atuação da proteção foi baseado no estudo de seletividade que é 110ms, sendo acrescidos 83ms, que é o tempo de abertura dos contatos do disjuntor de média tensão. Com base nestas informações o tempo total de limpeza para uma falha de arco elétrico de é de 0,193ms para situação proposta.

Como a energia incidente é diretamente proporcional ao tempo de duração, com a redução do tempo de atuação da proteção, conseqüentemente fez com que o nível de energia incidente de arco elétrico na entrada do DJ-XXA-01-003 tenha seu valor reduzido em 33,6%.

6 CONCLUSÃO

Este trabalho teve como propósito compreender os conteúdos de proteção, tais como, coordenação e seletividade, além do método para calcular energia incidente de arco elétricos em acionamentos elétricos de uma planta industrial, com objetivo de aplica-los em um estudo de caso.

A utilização do PTW foi essencial para a realização do estudo, pois a partir das funções disponíveis, foi possível conseguir de maneira ágil os valores de energia incidente nos pontos de interesse, além das curvas de tempo x corrente dos dispositivos de proteção em estudo.

Com o desenvolvimento deste trabalho foi possível compreender os efeitos devastadores do fenômeno arco elétrico, a importância de fazer um estudo de coordenação e seletividade com a melhor técnica, com objetivo de reduzir a energia incidente antes da aplicação do EPI para a proteção do trabalhador e quando não for possível eliminar totalmente, empregar o EPI dentro da categoria.

Foi possível comprovar uma redução de 33,6% da energia incidente de arco elétrico em um barramento que apresentava um valor acima do valor adotado como critério para análise em uma planta industrial, e sugerir mudanças em seu sistema elétrico para minimizar os riscos de acidente a exposição dos trabalhadores a essa energia, foram alcançados com as explicações expostas no capítulo 5 deste trabalho.

6.1 Trabalhos futuros

Replicar este trabalho em outros equipamentos da planta com o foco em redução do tempo e conseqüentemente a redução da energia incidente do arco elétrico.

Avaliar instalação de relé dedicado a proteção contra arco elétrico no equipamento em estudo, com objetivo de reduzir ainda mais a energia incidente em seus acionamentos.

REFERÊNCIAS

AGENCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA-ANEEL. *Indicadores de Segurança do Trabalho e das Instalações*. Disponível em:<[http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/IndicadoresSegurancaTrabalho/pesquisaG](http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/IndicadoresSegurancaTrabalho/pesquisaGeral.cfm)eral.cfm.> Acesso em 15-05-2019 as 18horas.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS-ABNT.NBR 16384: *Segurança em eletricidade*. 2015.

BARROS, Benjamin Ferreira; GEDRA, Ricardo Luis. *Cabine Primária – Subestações de Alta Tensão de consumidor*. 4.ed. São Paulo - SP. Editora Erica Ltda. 2015. 192p.

CREDER, Hélio. *Instalações Elétricas*: 16ª edição. Rio de Janeiro, RJ. Uma editora integrante do GEN | Grupo Editorial Nacional. LTC - Livros Técnicos e Científicos Editora Ltda. 2016. 494p.

CUNHA, Livia. Relés e contadores. Revista: O setor elétrico. ED, v. 45, 9009.

FILHO, João Mamede. *Instalações elétricas industriais*: 9. ed. - Rio de Janeiro: LTC . 2018. 976p. Disponível em:<
<https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788521633730/cfi/6/32!/4/364/6/2@0:21.7> >Acesso em 17 novembro 2019.

FILHO, João Mamede. *Manual de equipamentos elétricos*: 4.ed. -. Rio de Janeiro: LTC - Livros Técnicos e Científicos Editora Ltda. 2015.686p.

FILHO, João Mamede; MAMEDE, Daniel Ribeiro. *Proteção de Sistema Elétricos de Potência*. 9. ed. - - Rio de Janeiro: LTC - Livros Técnicos e Científicos Editora Ltda. 2017. 60p.

FOGAÇA, Jennifer Rocha Vargas. "Plasma – outro estado da matéria"; Brasil Escola. Disponível em <<https://brasilecola.uol.com.br/quimica/plasmaoutro-estado-materia.htm>>. Acessado em: 21 de out. 2019.

IEEE STD. 1584b-2011 – “IEEE Guide for Performing *Arc-Flash Hazard Calculations*”, 2002.

IEEE Std. 1584. “ IEEE Guide for performing arc-flash hazard calculations”, 2002.

JR., S., dos, J. R. (06/2016). **NR-10: Segurança em Eletricidade - Uma Visão Prática**. 2016. 2.ed. Editora Érica | Saraiva.

KHAN, Abeera; AMAN, Mohammad Mohsin. *Investigation of the effects of critical incident energy parameters using ETAP® to reduce arc flash hazards*. In: 2018 1st International Conference on Power, Energy and Smart Grid (ICPESG). IEEE, 2018. p. 1-6.

LEE, Ralph H. *The other electrical hazard: Electric arc blast burns*. IEEE Transactions on Industry Applications, n. 3, p. 246-251 1982.

MARDEGAN, Claudio. *Proteção e Seletividade em Sistemas Elétricos*. 1.ed. São Paulo. Atitude Editorial LTDA. 2012. 399p.

MINISTÉRIO DO TRABALHO E EMPREGO - MTE. *Norma regulamentadora Nº 6 – Equipamento de Proteção Individual – EPI*, 2018.

MINISTÉRIO DO TRABALHO E EMPREGO - MTE. *Norma regulamentadora Nº 10 - Segurança em Instalações e Serviços em Eletricidade*, 2016;

NANINI, Lucas; *Segurança do profissional vai além dos Equipamentos de Proteção Individual (EPIs)*, Disponível em:< <http://trabalho.gov.br/noticias/6604-seguranca-do-profissional-vai-alem-dos-equipamentos-de-protecao-individual-epis-2>.> Acesso em 01-05-2019 as 12horas.

NFPA – National Fire Protection Association - www.nfpa.org.

NFPA 70E-2015 – “*Standard for Electrical Safety Requirements for Employee Workplaces*”, 2015.

OSHA - *Occupational Safety and Health Administration* – <https://www.osha.gov>;
Protection From Flames and Electric Arcs; disponível em:
<<https://www.osha.gov/laws-regs/regulations/standardnumber/1910/1910.269AppE>
>. acessado em 18-05-2019 as 21horas.

RESENDE, Filipe Barcelos. **Proteção elétrica em subestações: uma abordagem sobre a energia incidente**. 2016. Tese de Doutorado. Dissertação de pós-graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.

SANTOS, V. J.; BALDON, W. R. *Tecnologia para redução da energia incidente nas instalações industriais*. disponível em:
<<https://www.osetoreletrico.com.br/tecnologia-para-reducao-da-energia-incidente-nas-instalacoes-industriais/>; Acesso em 23-05-2019 as 20horas;

SANTOS, Vanessa Malaco dos et al. *Estudo de caso de curto-circuito em um sistema elétrico industrial*. 2009. Tese de Doutorado. UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO.

Anexos

Anexo A - Nomenclatura das funções de proteção e manobra (ANSI)

Código	Função	Código	Função
1	Elemento principal	50	Relé de sobrecorrente instantâneo
2	Relé de partida ou fechamento temporizado	51	Relé de sobrecorrente-tempo
3	Relé de verificação ou interbloqueio	52	Disjuntor e corrente alternada
4	Contactador principal	53	Relé para excitatriz ou gerador em corrente cc
5	Dispositivo de interrupção	54	Disjuntor de corrente contínua, alta velocidade
6	Disjuntor de partida	55	Relé de fator de potência
7	Disjuntor de anodo	56	Relé de aplicação em acampo
8	Dispositivo de desconexão da energia de controle	57	Dispositivo para aterramento ou curto-circuito
9	Dispositivo de reversão	58	Relé de falha de retificação
10	Chave de sequência das unidades	59	Relé de sobretensão
11	Reservada para futura aplicação	60	Relé de balanço de tensão/queima de fusíveis
12	Dispositivos de sobrevelocidade	61	Relé de balanço de corrente
13	Dispositivo de rotação	62	Relé de abertura temporizada
14	Dispositivos de sobrevelocidade	63	Relé de pressão de nível ou fluxo/ líquido ou gás
15	Dispositivo de ajuste de velocidade ou frequência	64	Relé de proteção a terra
16	Reservado para futura aplicação	65	Regulador
17	Chave de derivação ou descarga	66	Dispositivo de supervisão de números de partidas
18	Dispositivo de aceleração ou desaceleração	67	Relé direcional de sobrecorrente em CA
19	Contactador de transição partida-marcha	68	Relé de bloqueio
20	Válvula operada eletricamente	69	Dispositivo de controle permissivo
21	Relé de distância	70	Reostato eletricamente operado
22	Disjuntor equalizador	71	Dispositivo de detecção de nível
23	Dispositivo de controle de temperatura	72	Disjuntor de corrente contínua
24	Reservado para futura aplicação	73	Contactador de resistência de carga
25	Dispositivo de sincronização/ conferencia	74	Relé de alarme
26	Dispositivo térmico do equipamento	75	Mecanismo de mudança de posição
27	Relé de subtensão	76	Relé de sobrecorrente contínua
28	Reservado para futura aplicação	77	Transmissor de impulsos
29	Contactador de isolamento	78	Relé de medição de ângulo de fase
30	Relé anunciador	79	Relé de religamento em corrente alternada
31	Dispositivo de excitação em separado	80	Reservado para futura aplicação
32	Relé direcional de potência	81	Relé de frequência
33	Chave de posicionamento	82	Relé de religamento em corrente contínua
34	Chave de sequência operada por motor	83	Relé de seleção de controle
35	Dispositivos para operação das escovas	84	Mecanismo de operação
36	Dispositivo de polaridade	85	Relé de onda portadora ou fio piloto
37	Relés de sobrecorrente ou subpotência	86	Relé auxiliar de bloqueio de segurança
38	Dispositivo de proteção de mancal	87	Relé e proteção diferencial
39	Reservado para futura aplicação	88	Motor auxiliar ou motor gerador
40	Relé de campo	89	Chave seccionadora
41	Disjuntor ou chave de campo	90	Dispositivo de regulação
42	Disjuntor ou chave de operação normal	91	Relé direcional de tensão
43	Dispositivo seletor de transferência manual	92	Relé direcional de tensão e potência
44	Relé de sequência de partidas das unidades	93	Contactador de variação de campo
45	Reservado para futura aplicação	94	Relé de desligamento ou livre atuação
46	Relés de reversão ou balanceamento de corrente de fase	95	Empregado para aplicações não definidas
47	Relé de sequência de fase de tensão	96	Empregado para aplicações não definidas
48	Relé de sequência incompleta	97	Empregado para aplicações não definidas
49	Relé de térmico para máquina ou transformador	98	Empregado para aplicações não definidas

Fonte: Filho e Mamede (2017 pag.11)

Anexo B - Nomenclatura complementar das funções de proteção e manobra (ANSI)

Código	Função
21B	Proteção subimpedância : Conta curto-circuitos fase-fase
27Tn	Proteção subresidual de terceira harmônica
37P	Proteção direcional de sobrepotência ativa
37Q	Proteção direcional de sobrepotência reativa
48-51LR	Proteção contra partida longa, rotor bloqueado
49T	Supervisão de temperatura
50N	Sobrecorrente instantâneo de neutro
51N	Sobrecorrente temporizado de neutro (tempo definido ou curvas inversas)
50G	Sobrecorrente instantâneo de terra
50GS	Sobrecorrente instantâneo terra
51G	Sobrecorrente temporizado de terra e com tempo definido ou curvas inversas
51GS	Sobrecorrente temporizado de terra e com tempo definido ou curvas inversas
50BF	Relé de proteção contra falha no disjuntor
51Q	Relé de sobrecorrente temporizado de sequência negativa com tempo definido
51V	Relé de sobrecorrente com restrição de tensão
51C	Relé de sobrecorrente com controle de torque
59Q	Relé de sobretensão de sequência negativa
59N	Relé de sobretensão residual ou sobretensão de neutro
62BF	Relé de proteção contra falha no disjuntor
64G	Relé de sobretensão residual ou sobretensão de neutro
64REF	Proteção diferencial de fuga a terra restrita
67N	Relé de sobrecorrente direcional de neutro instantâneo ou temporizado
67G	Relé de sobrecorrente direcional de terra instantâneo ou temporizado
67Q	Relé de sobrecorrente direcional de sequência negativa
78PS	Proteção de perda de sincronismo
81L	Proteção de subfrequência
81H	Proteção de subfrequência
81R	Taxa de variação da frequência (df/dt)
87B	Proteção diferencial de barramento
87T	Relé diferencial de transformador
87L	Proteção diferencial de linha
87G	Relé diferencial de gerador
87GT	Proteção diferencial do grupo gerador-transformador
87B	Proteção diferencial de barra
87M	Proteção diferencial de motores

Fonte: Filho e Mamede (2017 pag.11)