



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO
PRÓ-REITORIA DE GRADUAÇÃO
CENTRO MULTIDISCIPLINAR DE CARAÚBAS
CURSO DE BACHARELADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

GENÉZIO ARAÚJO DE MEDEIROS NETO

**PROJETO DO SISTEMA DE PROTEÇÃO DA REDE INTERNA DE MÉDIA
TENSÃO DA UFERSA - CARAÚBAS**

CARAÚBAS

2019

GENÉZIO ARAÚJO DE MEDEIROS NETO

**PROJETO DO SISTEMA DE PROTEÇÃO DA REDE INTERNA DE MÉDIA
TENSÃO DA UFERSA - CARAÚBAS**

Monografia apresentada a Universidade Federal Rural do Semi-Árido como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Francisco das Chagas Barbosa de Sena.

CARAÚBAS

2019

© Todos os direitos estão reservados a Universidade Federal Rural do Semi-Árido. O conteúdo desta obra é de inteira responsabilidade do (a) autor (a), sendo o mesmo, passível de sanções administrativas ou penais, caso sejam infringidas as leis que regulamentam a Propriedade Intelectual, respectivamente, Patentes: Lei nº 9.279/1996 e Direitos Autorais: Lei nº 9.610/1998. O conteúdo desta obra tomar-se-á de domínio público após a data de defesa e homologação da sua respectiva ata. A mesma poderá servir de base literária para novas pesquisas, desde que a obra e seu (a) respectivo (a) autor (a) sejam devidamente citados e mencionados os seus créditos bibliográficos.

M488p Medeiros Neto, Genézio Araújo de. Projeto do Sistema de Proteção da Rede Interna de Média Tensão da UFERSA - Caraúbas / Genézio Araújo de Medeiros Neto. - 2019.
70 f. : il.

Orientador: Francisco das Chagas Barbosa de Sena.

Monografia (graduação) - Universidade Federal Rural do Semi-árido, Curso de Engenharia Elétrica, 2019.

1. Proteção. 2. Coordenação. 3. Seletividade.
I. Sena, Francisco das Chagas Barbosa de, orient.
II. Título.

O serviço de Geração Automática de Ficha Catalográfica para Trabalhos de Conclusão de Curso (TCC's) foi desenvolvido pelo Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação da Universidade de São Paulo (USP) e gentilmente cedido para o Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (SISBI-UFERSA), sendo customizado pela Superintendência de Tecnologia da Informação e Comunicação (SUTIC) sob orientação dos bibliotecários da instituição para ser adaptado às necessidades dos alunos dos Cursos de Graduação e Programas de Pós-Graduação da Universidade.

GENÉZIO ARAÚJO DE MEDEIROS NETO

**PROJETO DO SISTEMA DE PROTEÇÃO DA REDE INTERNA DE MÉDIA
TENSÃO DA UFERSA - CARAÚBAS**

Monografia apresentada a Universidade
Federal Rural do Semi-Árido como
requisito para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Elétrica.

Defendida em: 09 / 08 / 2019.

BANCA EXAMINADORA

[Redacted Signature]

Dr. Francisco das Chagas Barbosa de Sena (UFERSA)
Presidente

[Redacted Signature]

Dr. Tânia Luna Laura (UFERSA)
Membro Examinador

[Redacted Signature]

Nayana Letícia de Moraes Viana (UFERSA)
Membro Examinador

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, por manter viva em mim a vontade de lutar, para que possa alcançar meus objetivos.

Agradeço aos meus pais, pelo suporte e apoio durante toda trajetória acadêmica

Agradeço também a toda minha família, por ter torcido e estar sempre presente nos momentos difíceis.

Agradeço ao orientador, pela disposição e paciência em me ajudar na realização do trabalho.

Agradeço aos meus colegas de curso, por sempre me apoiar nos momentos críticos.

Agradeço a banca, pelo interesse e disponibilidade

..

Imagine uma nova história para sua vida e acredite nela.

Paulo Coelho.

RESUMO

Os sistemas elétricos de potência estão constantemente expostos a situações as quais seu funcionamento pode ser prejudicado, podendo gerar diversos prejuízos aos seus usuários, assim, é fundamental a existência de um sistema de proteção corretamente projetado para garantir o bom funcionamento da rede elétrica. Este trabalho apresenta um estudo de proteção da rede interna de média tensão da UFERSA – Caraúbas. Nesse estudo, realizou-se o cálculo dos parâmetros das chaves fusíveis e relé de proteção. Tais dispositivos foram dimensionados e ajustados para atender aos critérios de coordenação e seletividade necessários para garantir a segurança da rede e seus usuários. Ao final do projeto, verificou-se que a situação real da proteção instalada no campus pode ser melhorada através da instalação de duas chaves fusíveis no alimentador principal.

Palavras-chave: Proteção. Coordenação. Seletividade.

ABSTRACT

Electrical power systems are constantly exposed to situations in which their operation may be impaired and may cause several damages to their users, so it is essential to have a properly designed protection system to ensure the proper functioning of the electrical network. This paper presents a study of protection of the internal medium voltage network of UFERSA - Caraúbas. In this study, the parameters of the fuse switches and protection relay were calculated. These devices have been sized and adjusted to meet the coordination and selectivity criteria necessary to ensure the security of the network and its users. At the end of the project, it was found that the actual campus protection situation could be improved by installing two fuse switches on the main feeder.

Keywords: Protection. Coordination. Selectivity.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Chave seccionadora.	15
Figura 2 - Chave seccionadora fusível.	16
Figura 3 - Disjuntor a óleo.	16
Figura 4 - Relé de sobrecorrente digital.	18
Figura 5 - Transformador de corrente	19
Figura 6 - Transformador de potencial.	20
Figura 7 - Chave fusível.	21
Figura 8 - Elo-fusível.	22
Figura 9 - Característica tempo x corrente de condutores de alumínio CAA.....	29
Figura 10 - característica tempo x corrente dos elos-fusíveis tipo K.	30
Figura 11 - característica tempo x corrente dos elos-fusíveis tipo H.	31
Figura 12 - Representação das componentes simétricas de sequência positiva, negativa e zero.	34
Figura 13 - Representação do curto-circuito trifásico.	36
Figura 14 - Circuito equivalente para curto-circuito trifásico.....	37
Figura 15 - Representação do Curto-circuito bifásico.	37
Figura 16 - Circuito equivalente para o curto-circuito bifásico.	38
Figura 17 - Representação do curto-circuito bifásico-terra.....	39
Figura 18 - Circuito equivalente para o curto-circuito bifásico-terra.	40
Figura 19 - Representação do curto-circuito fase-terra.	41
Figura 20 - Circuito equivalente para o curto-circuito fase-terra.....	42
Figura 21 - Representação do curto-circuito fase-terra mínimo.	43
Figura 22 - Circuito equivalente para o curto-circuito fase-terra mínimo.	44
Figura 23 - Rede de distribuição da UFERSA -Caraúbas.	46
Figura 24 - Subestação da UFERSA – Caraúbas.	47
Figura 25 - TCs e TPs instalados na subestação da UFERSA – Caraúbas.....	47
Figura 26 - Chave sec. - UFERSA - Caraúbas.....	48
Figura 27 - Disj. equipado com relé - UFERSA – Caraúbas.....	48
Figura 28 - Diagrama unifilar da instalação.....	50
Figura 29 - Identificação dos pontos de cálculo dos níveis de curto-circuito na rede interna de média tensão da UFERSA-Caraúbas.....	54
Figura 30 - Coordenograma das unidades 50 e 51 de fase.	66
Figura 31 - Coordenograma das unidades 50 e 51 de neutro.	66

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Coordenação de Elos K e H.....	23
Tabela 2 - Coordenação de elos K.....	23
Tabela 3 - Correntes nominais e admissíveis de elos-fusíveis K e T e suas respectivas chaves fusíveis.....	32
Tabela 4 - Chaves fusíveis mais usadas no Brasil.	32
Tabela 5 - Dados fornecidos pela COSERN.	49
Tabela 6 - Tipo de condutor e distâncias entre os pontos.	51
Tabela 7 - Impedância de cabos CAA.....	52
Tabela 8 - Impedâncias entre trechos.	52
Tabela 9 - Correntes de curto-circuito e correntes assimétricas.	54
Tabela 10 - Ajustes obtidos para o relé da UFERSA:- Caraúbas.....	67

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
COSERN	Companhia Energética do Rio Grande do Norte
CAA	Cabo com Alma de Aço
UFERSA	Universidade Federal Rural do Semi-Árido
NBI	Nível Básico De Isolamento
NBR	Norma Brasileira
PRODIST	Procedimentos De Distribuição De Energia Elétrica No Sistema Elétrico Nacional
TC	Transformador de Corrente
TP	Transformador de Potencial
TMS	Time Multiplier settings

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	12
1.1 Objetivos	13
1.1.1 Objetivo geral	13
1.1.2 Objetivos específicos.....	13
1.2 Organização do trabalho	14
2 PRINCIPAIS DISPOSITIVOS DE PROTEÇÃO	15
2.1 Chave seccionadora	15
2.2 Disjuntores.....	16
2.3 Relé de sobrecorrente.....	17
2.4 Transformador de corrente (TC)	19
2.4.1 Relação de transformação (RTC).....	19
2.4.2 Fator de sobrecorrente	20
2.5 Transformador de potencial	20
2.6 Chaves fusíveis	21
2.7.1 Elo-fusível.....	21
3 CRITÉRIO DE COORDENAÇÃO E SELETIVIDADE	23
3.1 Elo-fusível-elos-fusível	23
3.2 Relé-elos-fusível.....	24
3.3 Unidades do relé	24
4 METODOLOGIA DE DIMENSIONAMENTO.....	27
4.1 Dimensionamento de elos-fusíveis	27
4.1.1 Elos-fusíveis para proteção de transformador de distribuição	27
4.1.2 Elos-fusíveis para proteção de circuitos primários	27
4.2 Dimensionamento de chaves fusíveis.....	31
4.3 Dimensionamento do transformador de corrente (TC).....	33
4.4 Componentes simétricas.....	33
4.5 Modelagem dos curtos-circuitos através das componentes simétricas.....	35
4.5.1 Curto-circuito trifásico.....	36
4.5.2 Curto-circuito bifásico	37
4.5.3 Curto-circuito bifásico-terra	39
4.5.4 Curto-circuito fase-terra.....	41
4.5.5 Curto-circuito fase-terra-mínimo	43
4.6 Corrente assimétrica.....	44
5 RESULTADOS.....	46
5.1 Subestação da Ufersa - Caraúbas	46

5.2 Dados coletados.....	49
5.3 Correntes de curto-circuito	53
5.4 Dimensionamento dos elos e chaves fusíveis	55
5.4.1 Dimensionamento de elos-fusíveis.....	55
5.4.2 Dimensionamento das chaves fusíveis	59
5.6 Relé de entrada da UFERSA – Caraúbas.....	59
5.6.1 Dimensionamento do TC.....	60
5.6.2 Proteção de fase - Unidade 51F.....	60
5.6.3 Proteção de fase - Unidade 50F.....	61
5.6.4 Proteção de neutro - Unidade 51N.....	62
5.6.5 Proteção de neutro - Unidade 50N.....	63
5.7 Coordenação relé da UFERSA – relé da COSERN	64
6 CONCLUSÃO	68
REFERÊNCIAS.....	69

1 INTRODUÇÃO

A energia elétrica é um dos recursos mais utilizados pela sociedade moderna, sua aplicação varia desde simples atividades até as mais complexas. Da geração até o ponto de consumo existe um processo sistemático que pode ser dividido em três fases: geração, transmissão e distribuição. No processo de geração ocorre a transformação da energia primária, por exemplo, energia potencial gravitacional armazenada em uma coluna de líquido, em energia elétrica através do uso dos geradores elétricos. Na transmissão, ocorre a interconexão entre usinas de geração e as regiões de grande consumo. A distribuição é a fase onde a energia elétrica é distribuída para os consumidores, que podem ser, residências, indústrias, ambientes prestadores de serviços, entre outros.

Segundo a ANEEL, a distribuição de energia elétrica caracteriza-se como o segmento do setor destinado ao rebaixamento da tensão proveniente do sistema de transmissão e ao fornecimento de energia elétrica ao consumidor final, sendo composto pela rede elétrica e pelo conjunto de instalações e equipamentos elétricos que operam em alta tensão (superior a 69 kV e inferior a 230 kV), média tensão (superior a 1 kV e inferior a 69 kV) e baixa tensão (igual ou inferior a 1 kV). O sistema de distribuição é regulado pelo PRODIST (Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional), que consiste de documentos elaborados pela ANEEL, com auxílio de entidades e associações do setor elétrico nacional, que visam normatizar e padronizar as atividades técnicas referentes ao funcionamento e desempenho dos sistemas de distribuição de energia elétrica.

Na operação dos sistemas elétricos de potência, surgem, com certa frequência, falhas em seus componentes que podem resultar em interrupções no fornecimento da energia elétrica, com a consequente redução da qualidade do serviço prestado (MAMEDE; MAMEDE FILHO, 2011). Para garantir a qualidade e confiabilidade do serviço, faz-se necessário que todo o sistema elétrico apresente um sistema de proteção corretamente projetado.

De acordo com Mamede e Mamede Filho (2011), a principal função do sistema de proteção é assegurar a desconexão de trecho do sistema elétrico submetido a qualquer anormalidade que o faça operar fora dos limites previstos. Além disso, o sistema de proteção tem a função de fornecer as informações necessárias aos responsáveis por sua operação, de modo a facilitar a identificação dos defeitos e a

sua consequente recuperação. Os principais elementos de proteção contra sobrecorrentes (sobrecarga e curto-circuito) utilizados no sistema elétrico de potência são os seguintes: chave-fusível, religador, chave seccionadora, disjuntor e relé. Para que esses dispositivos funcionem corretamente, devem-se utilizar critérios de coordenação e seletividade adequados e compatíveis com as condições de falta nos pontos em que os mesmos serão instalados.

Quando o projeto de proteção não está em conformidade com os requisitos de coordenação e seletividade, a ocorrência de sobrecorrentes pode gerar prejuízos graves para a instalação consumidora e a vida de funcionários e usuários da rede, tais como: queima de equipamentos, rompimentos de cabos, explosões de transformadores e acidentes fatais. Além disso, o desligamento não planejado da instalação pode resultar em perda de produtividade e interferência no desenvolvimento das atividades normais despendidas nos locais conectados ao trecho defeituoso.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo geral

O presente trabalho tem como objetivo geral realizar o projeto dos dispositivos de proteção da rede interna de média tensão da UFERSA-Caraúbas.

1.1.2 Objetivos específicos

Para cumprir o objetivo geral, foram elencados os seguintes objetivos específicos:

- Realizar um estudo teórico referente a temática proposta;
- Obter dos parâmetros técnicos do relé instalado na subestação de entrada de energia da UFERSA - Caraúbas;
- Determinar os níveis de curto-circuito nos diversos pontos da instalação; redes de sequências para as faltas analisadas.
- Realizar a coordenação e seletividade entre os dispositivos de proteção.

1.2 Organização do trabalho

No presente trabalho, o capítulo 2 aborda a importância do sistema de proteção e seus principais dispositivos de proteção. No capítulo 3 são abordados os critérios de coordenação e seletividade entre elo-fusível-elofusível e elo-fusível-relé. No capítulo 4 mostra a metodologia utilizada para o dimensionamento dos dispositivos de proteção e fornece a modelagem matemática necessária para obter os níveis de curto-circuito em diferentes pontos de uma rede elétrica. Os parâmetros coletados e calculados necessários para a análise do estudo de proteção são discutidos no capítulo 5. Por fim, no capítulo 6, são feitas as considerações finais.

2 PRINCIPAIS DISPOSITIVOS DE PROTEÇÃO

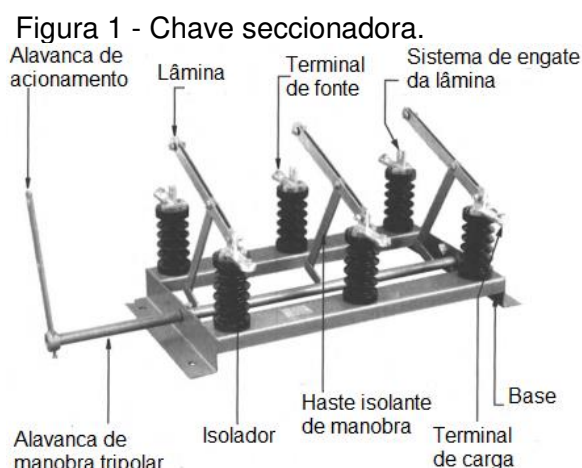
Todo sistema de proteção deve ser eficiente no desempenho de suas funções efetuando o isolamento da zona afetada pela falta, em um tempo, tal que, possa garantir a integridade do sistema de distribuição e a segurança das pessoas e animais. A seguir, serão apresentados os principais dispositivos utilizados para proteção de sistemas elétricos.

2.1 Chave seccionadora

Segundo Mamede Filho (2005), chave seccionadora é um dispositivo mecânico de manobra, capaz de fechar e abrir, em carga, circuitos de uma instalação sem defeito, com capacidade adequada de resistir aos esforços decorrentes. Na posição aberta, garante a distância de isolamento requerida pelo nível de tensão do circuito.

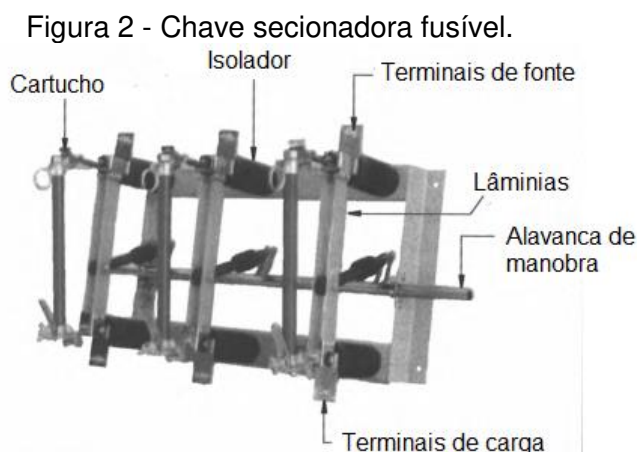
As chaves seccionadoras são utilizadas em subestações para permitir manobras de circuitos elétricos, sem carga, isolando disjuntores, transformadores de medida, de proteção e barramentos. Também são utilizados em redes aéreas de distribuição urbana e rural com a finalidade de seccionar os alimentadores durante os trabalhos de manutenção ou realizar manobras diversas previstas pela operação. Os seccionadores podem ser fabricados tanto em unidades monopolares como em unidades tripolares. (MAMEDE FILHO, 2005).

Uma chave seccionadora fusível tripolar usada em subestações abrigadas, é constituída por três lâminas condutoras de abertura simultânea, acionada por mecanismo articulado, como pode ser observado na Fig. 1.



Fonte: Mamede Filho, 2005.

As chaves seccionadoras podem ser dotadas de fusíveis, de acordo com Mamede Filho (2005), as chaves seccionadoras fusíveis são compostas por três hastes isolantes, normalmente de resina epóxi ou de fenolite, montadas em paralelo a três cartuchos fusíveis, assim como as demais, o acionamento da chave é tripolar e de comando simultâneo através do mesmo mecanismo articulado. Conforme Fig. 2.



Fonte: Mamede Filho, 2005.

2.2 Disjuntores

Segundo Mamede Filho (2005), o disjuntor é um dispositivo elétrico que tem a função de interromper as correntes de defeito de um determinado circuito durante o menor espaço de tempo possível. Realiza também, interrupção de correntes de circuitos operando a plena carga e em vazio, e energiza os mesmos circuitos em condições de operação normal. A Fig. 3 mostra o disjuntor à óleo.

Figura 3 - Disjuntor a óleo.



Fonte: Beghim, 2019.

Os disjuntores sempre devem ser instalados acompanhados da aplicação dos relés, que são os elementos responsáveis pela detecção das correntes elétricas do circuito que, após analisadas por sensores previamente ajustados, podem enviar ou não a ordem de comando para a sua abertura (MAMEDE FILHO, 2005).

No acionamento dos disjuntores, devido a energia armazenada no circuito, existe a presença do arco elétrico entre os contatos, que é extinto por um material dielétrico que envolve e desioniza o meio após a passagem da corrente. De acordo com Mamede Filho (2005), é pelo método de interrupção do arco que os disjuntores são caracterizados. Podendo ser:

- Disjuntor a óleo: É utilizado nos sistemas de média tensão e para aplicação geral em subestações consumidoras de pequeno e médio portes, a extinção do arco é realizada por um óleo isolante que envolve os contatos principais.
- Disjuntor a gás: Utiliza o hexafluoreto de enxofre ou SF₆, que é um gás altamente isolante, inerte, não inflamável, não tóxico e inodoro.
- Disjuntor a Vácuo: Um dos mais utilizados nas instalações industriais e comerciais de média tensão, utilizam uma câmara de vácuo como elemento de extinção do arco.

2.3 Relé de sobrecorrente

Os relés de proteção de sobrecorrente são dispositivos que tem o objetivo de verificar se a corrente que flui no trecho do sistema que se quer proteger, não é superior a corrente esperada para esse trecho.

Segundo Kindermann (2005), a função desses relés é identificar os defeitos, localizá-los da maneira mais exata possível, e promover a abertura de disjuntores de modo a isolar o defeito, mantendo o restante do sistema em operação normal, sem que os efeitos desse defeito prejudiquem sua normalidade.

Na ocorrência de um curto-circuito, por exemplo, quando a corrente atinge um valor acima dos valores previamente projetados, o relé identifica essa corrente e transmite um sinal para o disjuntor, de modo a desabilitar apenas o trecho defeituoso.

A proteção com relé de sobrecorrente é a mais econômica de todas as proteções utilizadas nos sistemas de potência e é também a que mais

frequentemente necessita de reajuste quando são efetuadas alterações na configuração do sistema. (MAMEDE; MAMEDE FILHO, 2011).

Normalmente os relés de sobrecorrentes são formados por uma unidade instantânea (50), que atua instantaneamente ou segundo um tempo previamente definido e uma unidade temporizada (51), que pode atuar com curvas de tempo dependente ou de tempo definido. As unidades são usadas para proteção das fases (unidades 50 e 51) e do Neutro ou terra (unidades 50N e 51N).

De acordo com Almeida (2000), as unidades temporizadas ou de tempo dependente, permitem dois tipos de ajustes, são elas: corrente mínima de atuação e curva de atuação. As unidades instantâneas trabalham com dois ajustes: corrente mínima de atuação e tempo de atuação. Atualmente, os relés digitais são os mais utilizados, pois permitem ajustes de tempo bastante precisos para a atuação das unidades, fato que não acontecia quando o uso de relés eletromecânicos era predominante.

Figura 4 - Relé de sobrecorrente digital.



Fonte: Prexton, 2019.

Segundo Mamede e Mamede Filho (2011), o funcionamento básico de um relé de sobrecorrente digital consiste em uma corrente que chega a seus terminais, fornecida pelos transformadores de corrente de linha, é reduzida por transformadores de corrente instalados internamente que modulam o seu valor para a entrada do conversor analógico/digital, esse conversor transforma a corrente em valores digitais que serão devidamente analisados pelo processador. Os valores ajustados no relé pelo operador são armazenados numa memória não volátil garantindo, assim, a integridade dos dados, mesmo com ausência de tensão auxiliar por longo período. Um relé digital existente no mercado pode ser observado na Fig. 4.

2.4 Transformador de corrente (TC)

Os transformadores de corrente (TCs) são equipamentos que permitem aos instrumentos de medição, controle e proteção funcionarem adequadamente sem a necessidade de possuírem correntes nominais de acordo com a corrente de carga do circuito ao qual estão ligados (MAMEDE FILHO, 2005).

Quanto a sua construção, na forma mais simples, os TCs possuem o enrolamento primário geralmente com poucas espiras. No secundário, a corrente nominal é transformada em um valor proporcionalmente menor. No Brasil, essa corrente é limitada ao valor máximo de 5 A

As principais finalidades do uso de TCs são (KINDERMANN, 2005):

- Isolar os equipamentos de medição, controle relés do circuito de alta tensão;
- Fornecer no seu secundário uma corrente proporcional à do primário;
- Fornecer no secundário uma corrente de dimensões adequadas para serem usadas nos equipamentos de medição, controle e proteção (relé).

Figura 5 - Transformador de corrente



Fonte: Rehtom, 2019.

2.4.1 Relação de transformação (RTC)

De acordo com Kindermann (2012), a relação de transformação do TC é definida como sendo a razão da corrente primária nominal (I_{pTC}) e a corrente secundária nominal (I_{sTC}), conforme a Equação 1:

$$RTC = \frac{I_{pTC}}{I_{sTC}} \quad (1)$$

2.4.2 Fator de sobrecorrente

Também denominado fator de segurança, é o fator pelo qual se deve multiplicar a corrente nominal primária do TC para se obter a máxima corrente no circuito primário até o limite de sua classe de exatidão (MAMEDE; MAMEDE FILHO, 2011). Conforme a NBR 6856 – Transformador de corrente – Especificação e Ensaio (2015), o fator de sobrecorrente para serviço de proteção deve ser 20 vezes a corrente nominal, no uso para medição, o fator de sobrecorrente será 4 vezes a corrente nominal.

2.5 Transformador de potencial

De acordo com Mamede Filho (2005), os transformadores de potencial são dispositivos que permitem aos instrumentos de medição, controle e proteção funcionarem adequadamente sem que seja necessário possuir tensão de isolamento de acordo com o nível de tensão da rede à qual estão ligados. Na Fig. 6, observa-se um transformador de potencial utilizados em subestações abrigadas.

Figura 6 - Transformador de potencial.



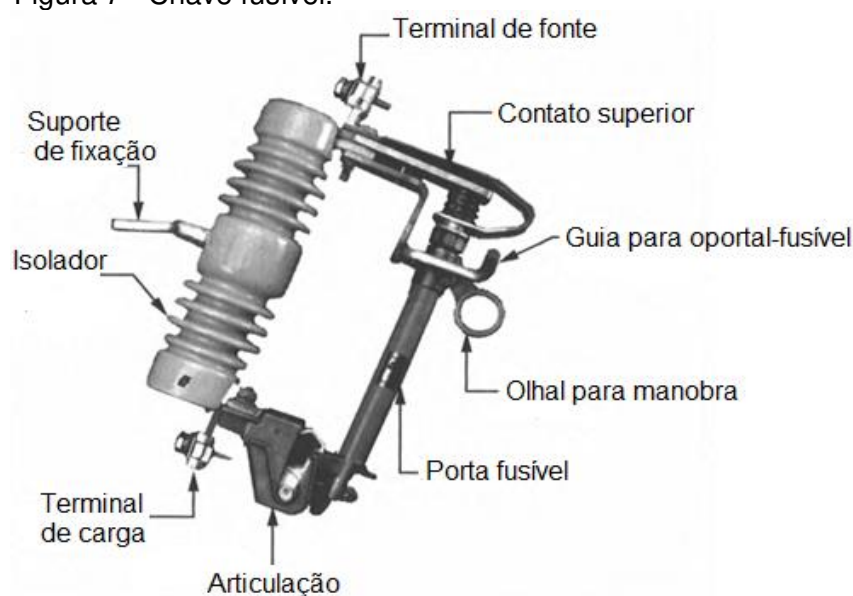
Fonte: Rehtom, 2019.

Na sua forma básica, os TPs possuem o enrolamento primário composto com muitas espiras. No enrolamento secundário é coletado o nível de tensão desejado, permitindo, assim como os TCs, que instrumentos de proteção, controle e medição sejam dimensionados em tamanhos reduzidos e com nível básico de isolamento (NBI) menor.

2.6 Chaves fusíveis

Chave fusível é um equipamento eletromecânico utilizado na proteção de redes de distribuição urbanas e rurais, na sua composição está o elo-fusível, que é o elemento de proteção, sua função é interromper o circuito quando é submetido a uma corrente de intensidade maior do que a esperada no ponto de sua instalação. A Fig. 7 ilustra uma chave fusível unipolar com seus respectivos componentes.

Figura 7 - Chave fusível.



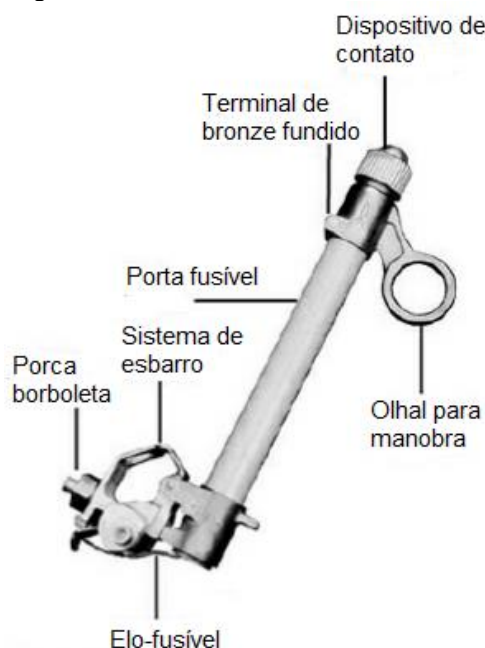
Fonte: Mamede Filho, 2005.

Para utilizá-la de forma correta é necessário conhecer algumas especificações, tais como: tensão nominal, nível básico de isolamento para impulso (NBI), frequência, corrente nominal, corrente de interrupção, corrente de curta-duração. De acordo com Almeida (2000), sob o ponto de vista de proteção, a característica mais importante é a corrente de interrupção, que deve ser especificada com base no valor assimétrico da corrente do maior curto-circuito no ponto de instalação da chave.

2.7.1 Elo-fusível

De acordo com Mamede Filho (2005), o elo-fusível é um elemento metálico onde é inserida um material sensível a correntes elétricas elevadas, fundindo-se e rompendo-se num intervalo de tempo inversamente proporcional à grandeza da referida corrente. Na Fig. 8, observa-se um elo-fusível genérico.

Figura 8 - Elo-fusível.



Fonte: Mamede; Mamede Filho, 2011.

O funcionamento do elo-fusível baseia-se na fusão do elemento fusível quando submetido a temperaturas elevadas, ou seja, quando uma corrente superior a corrente admissível percorrer o elo, ele irá fundir-se, e em conjunto com os outros elementos da chave fusível, interromperá o circuito ao qual está inserido.

A fusão do elo-fusível não determina que haja interrupção da corrente elétrica no circuito, pois nos sistemas de média tensão o arco elétrico continua fluindo entre os terminais separados do elo-fusível, devido ao ambiente fortemente ionizado. Para que seja garantida a interrupção da corrente elétrica, o elo-fusível possui um tubinho cobrindo seu elemento ativo que, ao ser queimado pelo arco, produz uma substância que aquecida libera gases desionizantes, aumentando a atividade de extinção do arco (MAMEDE; MAMEDE FILHO, 2011).

Segundo Mamede, Mamede Filho (2011), os elos-fusíveis são caracterizados pelas curvas de atuação tempo x corrente que permitem classificá-los em:

- Tipo H: Denominados fusíveis de alto surto, apresentam tempo de atuação lento e são utilizados somente na proteção de transformadores de distribuição;
- Tipo K: Apresentam tempo de atuação rápido, sendo utilizados normalmente na proteção de ramais de alimentadores de distribuição;
- Tipo T: São considerados fusíveis de atuação lenta. Sua aplicação principal é na proteção de ramais primários de redes aéreas de distribuição.

3 CRITÉRIO DE COORDENAÇÃO E SELETIVIDADE

A seguir serão indicados os critérios de coordenação entre elo-fusível-elo-fusível, entre elo-fusível-relé e determinação dos ajustes dos relés..

3.1 Elo-fusível-elo-fusível

Para ajustar a coordenação entre elos-fusíveis, serão utilizadas Tabelas de coordenação fornecidas pelos fabricantes. A Tab. 1 mostra o limite de corrente para os quais os elos-fusíveis tipos H e K, considerando diferentes correntes nominais, coordenam.

Tabela 1 - Coordenação de Elos K e H.

Elo protetor	Elo protegido												
	10K	12K	15K	20K	25K	30K	40K	50K	65K	80K	100K	140K	200K
2H	45	220	450	650	840	1060	1350	1700	2200	2800	3900	5800	9200
3H	45	220	450	650	840	1060	1350	1700	2200	2800	3900	5800	9200
5H	45	220	450	650	840	1060	1350	1700	2200	2800	3900	5800	9200
8H	45	220	450	650	840	1060	1350	1700	2200	2800	3900	5800	9200

Fonte: Adaptado de Almeida, 2000.

A Tab. 2, mostra o limite de corrente para os quais os elos-fusíveis tipos K, considerando diferentes correntes nominais, coordenam.

Tabela 2 - Coordenação de elos K.

Elo protetor	Elo protegido												
	10K	12K	15K	20K	25K	30K	40K	50K	65K	80K	100K	140K	200K
6K	190	350	510	650	840	1060	1340	1700	2200	2800	3900	5800	9200
8K		210	440	650	840	1060	1340	1700	2200	2800	3900	5800	9200
10K			300	540	840	1060	1340	1700	2200	2800	3900	5800	9200
12K				320	710	1050	1340	1700	2200	2800	3900	5800	9200
15K					430	870	1340	1700	2200	2800	3900	5800	9200
20K						500	1100	1700	2200	2800	3900	5800	9200
25K							660	1350	2200	2800	3900	5800	9200
30K								850	1700	2800	3900	5800	9200
40K									1100	2200	3900	5800	9200
50K										1450	3500	5800	9200
65K											2400	5800	9200

Fonte: Adaptado de Almeida, 2000.

3.2 Relé-elo-fusível

A seletividade entre relé e elo-fusível ocorrerá quando o tempo dos relés de fase e neutro estiverem, no ponto mais crítico, no mínimo 0,2s acima da curva de tempo total de interrupção do elo, para as correntes de curtos-circuitos de fase e terra. (ALMEIDA, 2000).

3.3 Unidades do relé

A seguir serão abordadas a metodologia dos ajustes das unidades de fase e neutro dos relés.

- Proteção de fase – Unidade 51F

De acordo com Mamede e Mamede Filho (2011), a corrente de ajuste da unidade 51F ($I_{aj.51F}$) é dada por:

$$I_{aj.51F} = \frac{K_F * I_{carga,màx}}{RTC} \quad (2)$$

Onde:

$I_{carga,màx}$ - Corrente de carga máxima da subestação;

K_F - Fator de sobrecorrente (1,20);

RTC - Relação de transformação do TC.

A corrente de atuação da unidade 51F ($I_{at.51F}$), pode ser obtida por:

$$I_{at.51F} = I_{aj.51F} * RTC \quad (3)$$

Segundo Kindermann (2005), o tempo de atuação para relé de sobrecorrente (t_{rele}), é obtido através da sua curva de atuação, que pode ser: normalmente inversa, moderadamente inversa, muito inversa ou extremamente inversa. Para o presente estudo, será considerada a curva normalmente inversa (NI), que segundo Mamede e Mamede Filho (2005), seguindo a norma IEC, pode ser obtido pela seguinte Equação.

$$t_{rele} = \frac{TMS * 0,14}{(M^{0,02} - 1)} \quad (4)$$

Em que:

TMS- Multiplicador de tempo;

M - Múltiplo do relé.

Segundo Mamede e Mamede Filho (2011), o múltiplo do relé (M) é definido para as unidades temporizadas de fase, levando em consideração a corrente de curto-circuito trifásica ($I_{cc,3\phi}$), através da seguinte equação:

$$M_{Fase} = \frac{I_{cc,3\phi}}{RTC * I_{aj.51F}} \quad (5)$$

•Proteção de fase – Unidade 50F

De acordo com Mamede e Mamede Filho (2011), a corrente de ajuste da unidade 50F ($I_{aj.50F}$) é dada por:

$$I_{aj.50F} = I_{aj.51F} * F \quad (6)$$

Onde:

F- Fator de sobrecorrente.

É desejável que:

$$F < \frac{I_{cc,3\phi,ass}}{I_{at,.51F}} \quad (7)$$

Onde:

$I_{cc,3\phi,ass}$ – Corrente de curto-circuito trifásica assimétrica.

A corrente de atuação da unidade 50F ($I_{at.50F}$), pode ser obtida por:

$$I_{at.50F} = I_{aj.50F} * RTC \quad (8)$$

•Proteção de neutro – Unidade 51N

Ainda de acordo com Mamede e Mamede Filho (2011), a corrente de ajuste da unidade 51N ($I_{aj.51N}$) é dada por:

$$I_{aj.51N} = \frac{K_N * I_{carga,max}}{RTC} \quad (9)$$

Em que:

$I_{carga,max}$ - Corrente de carga máxima da subestação;

K_N - Fator de sobrecorrente, que varia de 0.1 a 0.3.

A corrente de atuação da unidade 51N ($I_{at.51N}$), pode ser obtida por:

$$I_{at.51N} = I_{aj.51N} * RTC \quad (10)$$

E o múltiplo do relé é definido para as unidades temporizadas de neutro (M_{neutro}), levando em consideração a corrente de curto-circuito fase-terra mínimo ($I_{cc,\phi t-m}$), da seguinte forma:

$$M_{neutro} = \frac{I_{cc,\phi t-m}}{TRC * I_{aj.51N}} \quad (11)$$

- Proteção de neutro – Unidade 50N

De acordo com Mamede e Mamede Filho (2011), a corrente de ajuste da unidade 50N ($I_{aj.50N}$) é dada por:

$$I_{aj.50N} = I_{aj.51N} * F \quad (12)$$

F- Fator de sobrecorrente, dado por:

$$F < \frac{I_{cc,\phi t-m}}{I_{at.,51N}} \quad (13)$$

A corrente de atuação da unidade 50N ($I_{at.50N}$), pode ser obtida por:

$$I_{at.50N} = I_{aj.50N} * RTC \quad (14)$$

4 METODOLOGIA DE DIMENSIONAMENTO

A seguir será apresentada a metodologia de dimensionamento das chaves fusíveis, elos-fusíveis, transformador de corrente e ajustes dos relés de proteção.

4.1 Dimensionamento de elos-fusíveis

Para o dimensionamento de elos-fusíveis serão adotados os seguintes critérios:

4.1.1 Elos-fusíveis para proteção de transformador de distribuição

Serão considerados os seguintes requisitos para o dimensionamento dos elos-fusíveis para proteção de transformadores:

- a) Para a escolha do elo-fusível será necessária que a corrente nominal do elo-fusível seja 150% da corrente nominal do transformador.

$$I_{\text{nom.}-\text{elo}} \geq 1,5 * I_{\text{nom.}-\text{trans.}} \quad (15)$$

Onde:

$I_{\text{nom.}-\text{elo}}$ - Corrente nominal do elo-fusível;

$I_{\text{nom.}-\text{trans.}}$ - Corrente nominal do transformador;

- b) E de acordo com Mamede e Mamede Filho (2011), os seguintes requisitos precisam ser obedecidos para a escolha de elos-fusíveis para os transformadores de distribuição:

- b.1) O elo-fusível não deve atuar durante a energização do transformador, que normalmente é entre 8 a 12 vezes a corrente nominal do transformador;
- b.2) Os elos-fusíveis devem coordenar com as proteções instaladas à montante e a jusante do ponto de instalação do transformador.

4.1.2 Elos-fusíveis para proteção de circuitos primários

Segundo Almeida (2000), o dimensionamento de elos-fusíveis para proteção de circuitos primários, leva em conta os seguintes critérios:

- a) A corrente nominal do primeiro elo-fusível ($I_{nom.-,elo}$) para a proteção de um ramal, no sentido da carga para a fonte, deverá ser igual ou maior do que 1,5 vezes o valor máximo da corrente de carga ($I_{carga,máx}$) medida ou convenientemente avaliada no ponto considerado;

$$I_{nom.-,elo} \geq 1,5 * I_{carga,máx} \quad (16)$$

- b) Os demais elos-fusíveis instalados à montante do anterior, deverão obedecer aos critérios a seguir:

b.1) A capacidade nominal do elo-fusível deverá ser igual ou maior do que 1,5 vezes o valor máximo da corrente de carga medida ou convenientemente avaliada no ponto de instalação;

b.2) A capacidade nominal do elo-fusível protetor deverá ser, no máximo um quarto (1/4) da corrente de curto-circuito fase terra mínimo no fim do trecho protegido por ele;

$$I_{nom.-,elo} \leq \frac{1}{4} I_{cc,\phi t-m} \quad (17)$$

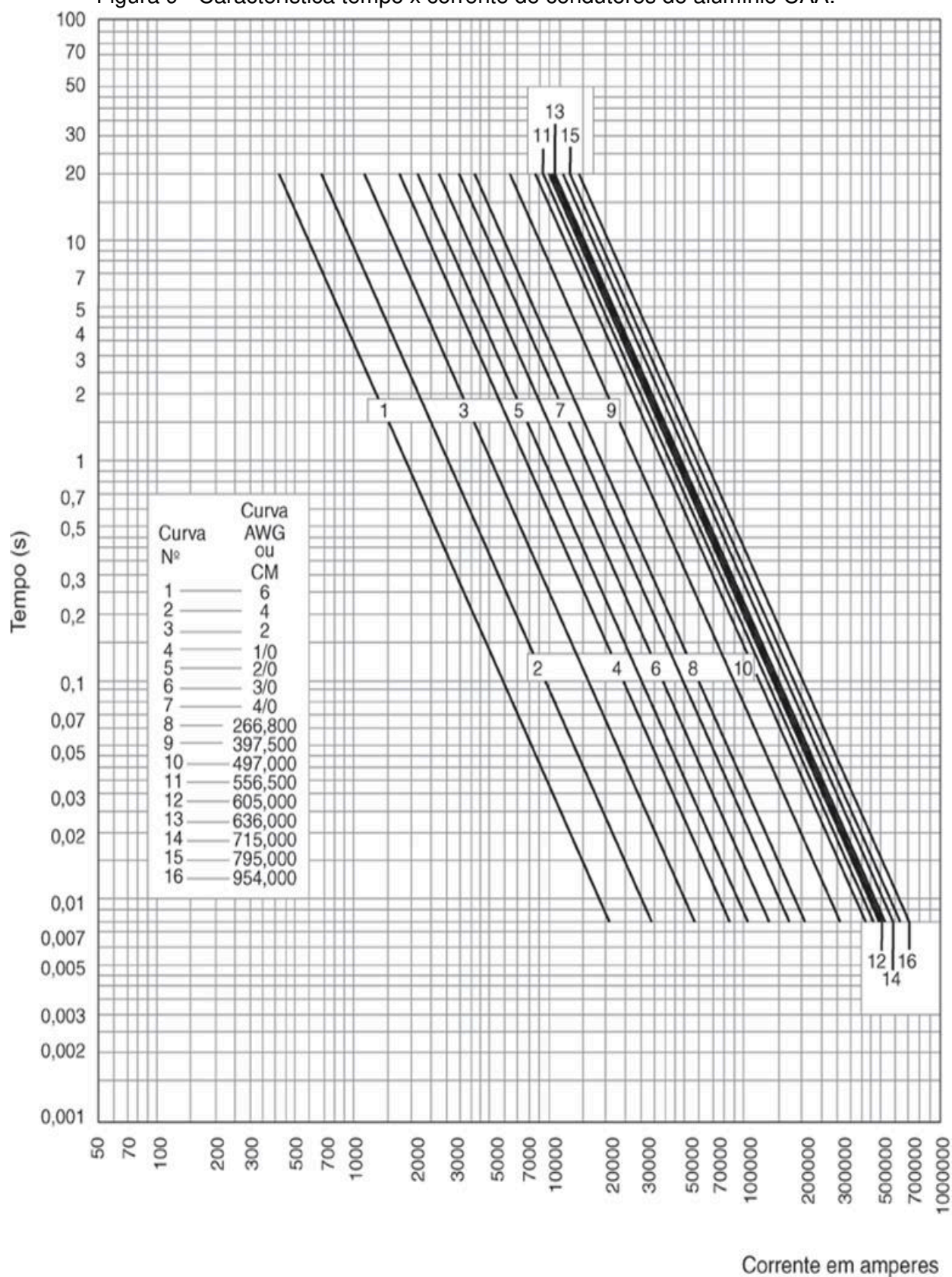
b.3) O elo protegido, deverá coordenar com o elo protetor, pelo menos, para o valor da corrente de curto-circuito fase-terra mínimo no ponto de instalação do elo protetor.

- c) Proteger os condutores das redes de distribuição contra fusão. De acordo com Mamede, Mamede Filho (2011), devem ser conhecidos os gráficos de característica tempo $\times$ corrente de suportabilidade dos cabos a fim de determinar o nível de proteção oferecido pelos elos fusíveis instalados nos alimentadores e ramais. A Fig. 9 mostra as curvas tempo $\times$ corrente do cabo CAA (Cabo de Alumínio com Alma de Aço).

- d) O elo-fusível não deve atuar para a corrente de magnetização dos transformadores do alimentador. Segundo Mamede, Mamede Filho (2011), a corrente de magnetização pode ser calculada, aproximadamente, 8 vezes a soma das correntes nominais ($I_{nom-trans.}$) dos transformadores do alimentador, assim:

$$I_{mag-elo} = 8 \sum I_{nom-trans.} \quad (18)$$

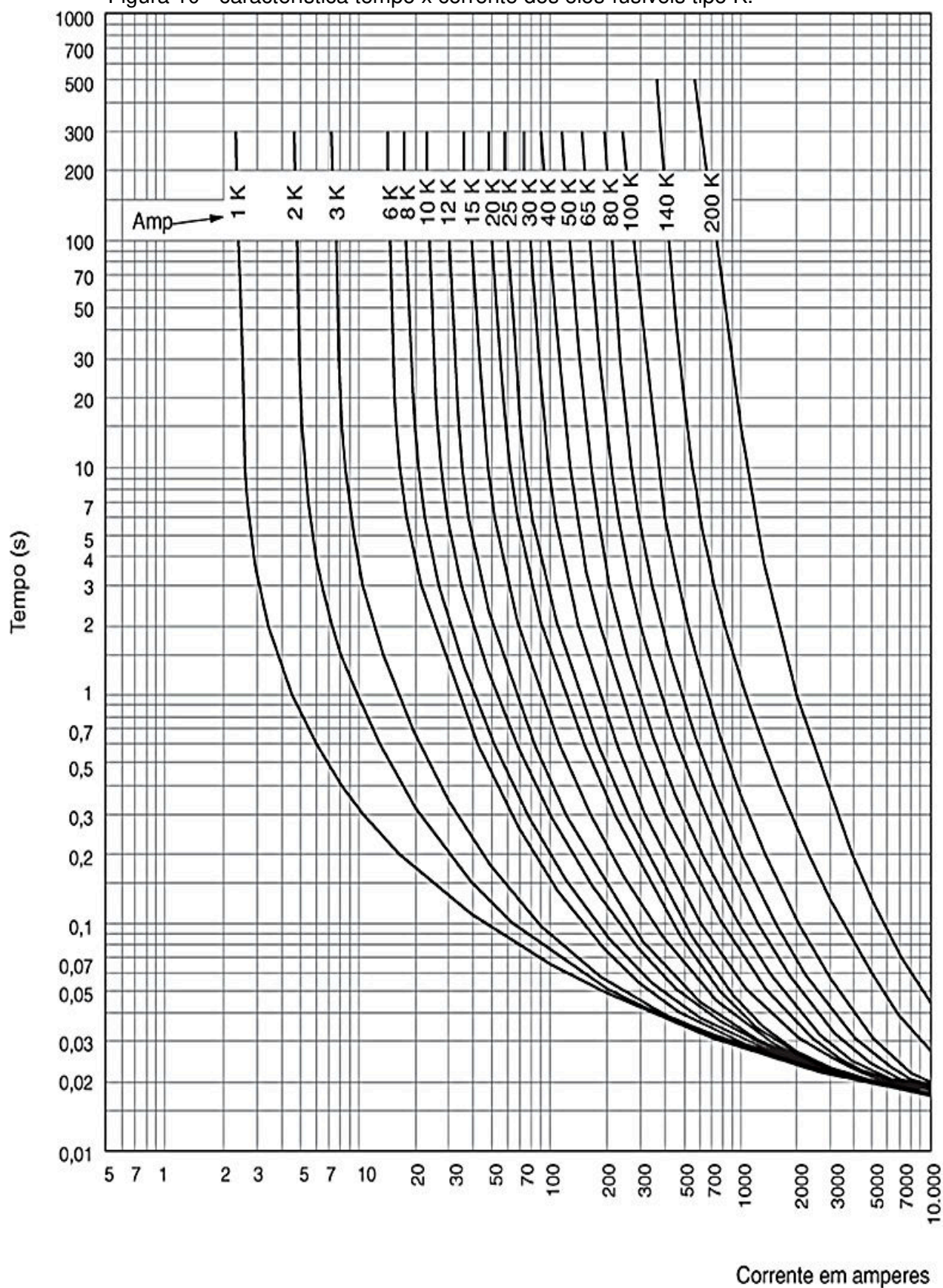
Figura 9 - Característica tempo x corrente de condutores de alumínio CAA.



Fonte: Mamede; Mamede Filho, 2011.

Abaixo, a Fig. 10 mostra as características tempo x corrente dos elos-fusíveis tipo K.

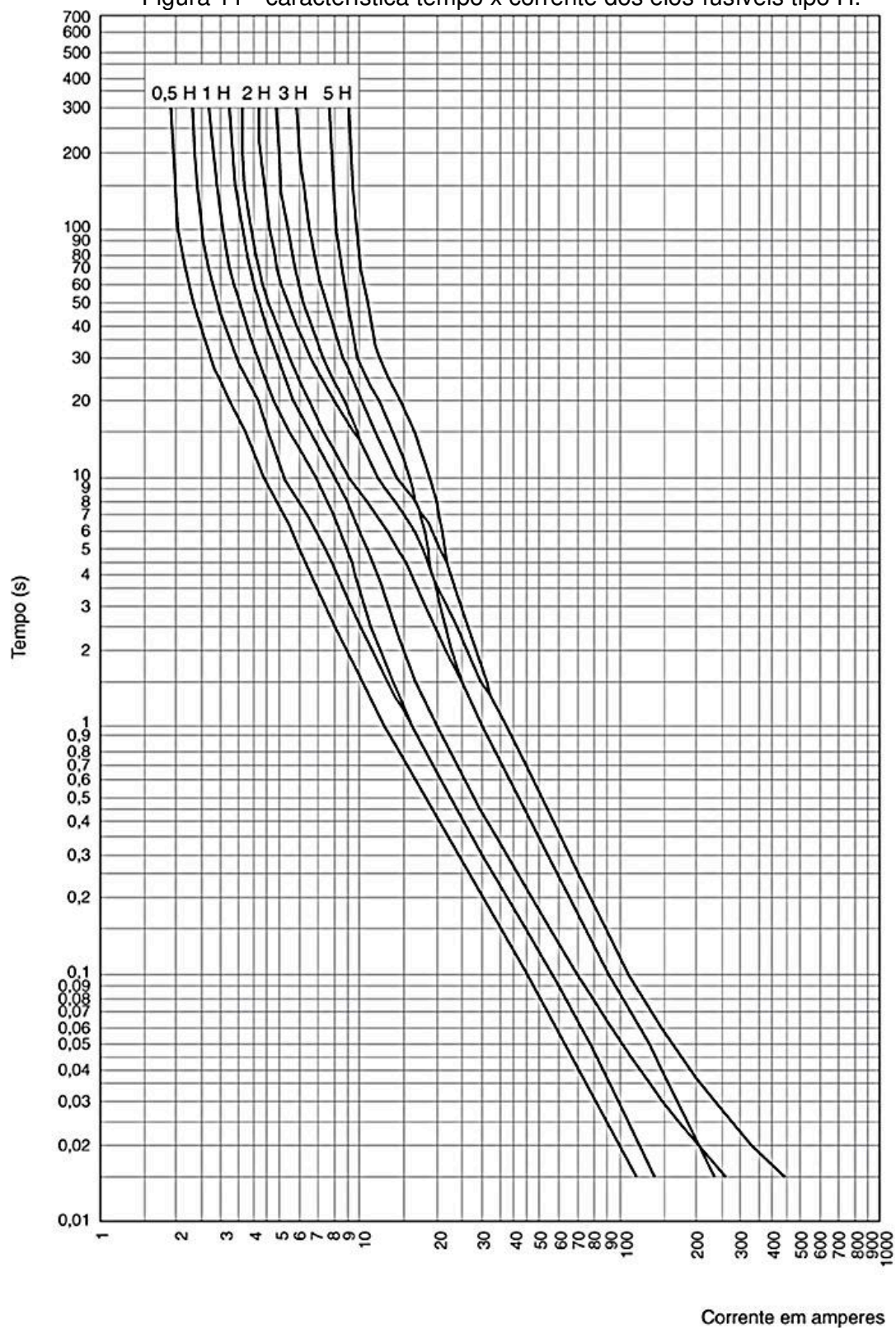
Figura 10 - característica tempo x corrente dos elos-fusíveis tipo K.



Fonte: Mamede, Mamede Filho, 2011.

A Fig. 11 mostra as características tempo x corrente dos elos-fusíveis tipo H.

Figura 11 - característica tempo x corrente dos elos-fusíveis tipo H.



Fonte: Mamede; Mamede Filho, 2011.

4.2 Dimensionamento de chaves fusíveis

A corrente nominal da chave fusível deve ser igual a pelo menos 150% da cor-

rente nominal do elo-fusível que será utilizado na proteção do ramal de distribuição. (MAMEDE, MAMEDE FILHO, 2011).

Na Tab. 3, estão dadas as correntes nominais e admissíveis dos elos tipo K e H mais comuns, com suas respectivas chaves.

Tabela 3 - Correntes nominais e admissíveis de elos-fusíveis K e T e suas respectivas chaves fusíveis.

Elo- fusível		Chave fusível – Corrente nominal (A)
Tipo H		
Corrente nominal (A)	Corrente admissível (A)	
5	5	
Tipo K		50
Corrente Nominal (A)	Corrente admissível	
8	12	
10	15	
20	30	
25	37,5	
30	45	
40	60	100
50	75	
65	97,5	
80	120	200

Fonte: Adaptado de Almeida, 2000.

Será considerado ainda que, a corrente de interrupção da chave deverá ser igual ou superior ao maior valor assimétrico da corrente de curto-circuito no ponto de instalação da mesma. Na Tab. 4 estão representadas as características elétricas das chaves fusíveis mais usadas no Brasil (ALMEIDA, 2000).

Tabela 4 - Chaves fusíveis mais usadas no Brasil.

Tensão nominal (KVA)	NBI	Corrente	
		Nominal (A)	De interrupção Assimétrica (KA)
15	95	50	1,2
15	95	100	2
15	95	100	4 ou 5
15	95	100	8 ou 10
15	110	200	4 ou 8
15	110	300	10

Fonte: Almeida, 2000.

4.3 Dimensionamento do transformador de corrente (TC)

Para ajustar a corrente de atuação do relé de sobrecorrente é necessário conhecer a relação de transformação do TC (RTC). De acordo com Kindermann (2005), pode ser obtida seguindo dois critérios, na Eq. 19 leva em consideração a potência instalada e tensão do alimentador, enquanto que a Eq. 20, relaciona a corrente de curto-circuito com o fator de sobrecorrente.

$$I_{\text{nom.},\text{PTC}} \geq \frac{S_{3\phi SE}}{\sqrt{3} * V_L} \quad (19)$$

Sendo:

$S_{3\phi SE}$ – Potência instalada da subestação;

$I_{\text{nom.},\text{PTC}}$ – Corrente nominal do primário do TC;

V_L – Tensão do alimentador.

$$I_{\text{nom.},\text{PTC}} \geq \frac{I_{CC,3\phi}}{FS} \quad (20)$$

Onde:

$I_{CC3\phi}$ – Valor da corrente de curto-circuito trifásica;

FS – Fator de sobrecorrente (usado em proteção FS=20).

4.4 Componentes simétricas

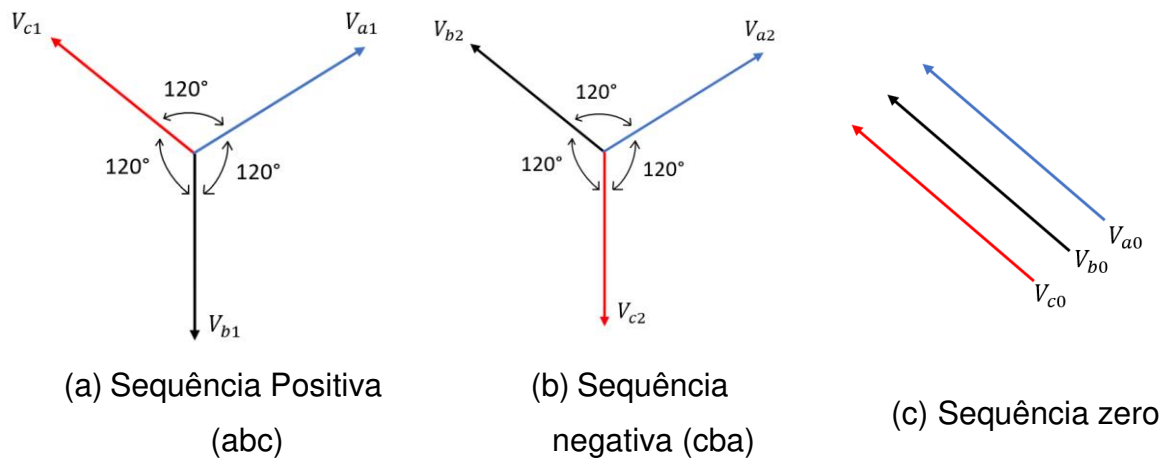
O método das componentes simétricas foi desenvolvido em 1918 por Charles LeGeyt Fortescue, sendo utilizado para calcular parâmetros em sistemas polifásicos desequilibrados. De acordo com o teorema de Fortescue, um conjunto N de fasores desequilibrados, e correlacionados, pode ser escrito através de N conjuntos de fasores equilibrados, chamados de componentes simétricas. Assim, tem-se que um sistema elétrico trifásico desequilibrado pode ser analisado através de três sistemas equilibrados de fasores, são eles (Stevenson Jr, 1986):

- Componentes de sequência positiva: Consiste em três fasores iguais em módulo, 120° defasados entre si e tendo a mesma sequência de fases que os fasores originais.
- Componentes de sequência negativa: Consiste em três fasores iguais em módulo 120° defasados entre si e tendo a sequência de fases oposta à dos fasores originais.

- Componentes de sequência zero: Consiste em três fasores iguais em módulo, e com defasagem nulo entre si.

A Fig. 12 ilustra as componentes de sequência dos fasores de tensão de fase (V_a , V_b e V_c), sendo que, os subíndices 0 representa as componentes de sequência zero, 1 representa as componentes de sequência positiva e 2 representa as componentes de sequência negativa. Além disso, os índices a , b e c são usados para representar as três fases do sistema.

Figura 12 - Representação das componentes simétricas de sequência positiva, negativa e zero.



Fonte: Adaptado de Stevenson Jr, 1986.

Os fasores desequilibrados podem ser descritos através de suas componentes simétricas como mostrado abaixo:

$$V_a = V_{a1} + V_{a2} + V_{a0} \quad (21)$$

$$V_b = V_{b1} + V_{b2} + V_{b0} \quad (22)$$

$$V_c = V_{c1} + V_{c2} + V_{c0} \quad (23)$$

Pode-se representar as componentes simétricas em termo dos fasores de tensão de fase como mostrado na Eq. 24.

$$\begin{bmatrix} V_{a0} \\ V_{a1} \\ V_{a2} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \alpha & \alpha^2 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \quad (24)$$

A partir da Eq. 24, pode-se escrever que:

$$V_{a0} = \frac{1}{3} (V_a + V_b + V_c) \quad (25)$$

Assim, verifica-se os sistemas cuja soma dos fasores fase é nula não apresentam componentes de sequência zero. Também é possível escrever as componentes de sequência dos fasores de corrente que flui nas fases do sistema em função e suas componentes simétricas como mostrado na Eq. 26.

$$\begin{bmatrix} I_{a0} \\ I_{a1} \\ I_{a2} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \alpha & \alpha^2 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} \quad (26)$$

Com base em Eq. 26, pode-se escrever que:

$$I_{a0} = \frac{1}{3} (I_a + I_b + I_c) \quad (27)$$

Onde as somas dos afiores de corrente de linha é igual a corrente que flui no condutor de neutro (I_n), logo:

$$I_n = 3I_{a0} \quad (28)$$

Através de Eq. 28, verifica-se que na ocorrência de uma falta em sistemas elétricos a três condutores (estrela sem neutro ou delta), as correntes que fluem em direção ao ponto de falta não apresentam componentes de sequência zero.

4.5 Modelagem dos curtos-circuitos através das componentes simétricas

De maneira geral, o curto-circuito ocorre quando dois ou mais pontos de um sistema elétrico, normalmente estão em potenciais diferentes, são conectados através de um caminho de baixa impedância. Esse tipo de evento impõe mudanças bruscas nos níveis de corrente do sistema, submetendo condutores e estruturas a esforços dinâmicos e térmicos elevados, o que pode provocar diversos problemas ao sistema elétrico.

Segundo Mamede e Mamede Filho (2011), as sobrecorrentes provenientes de curtos-circuitos provocam distúrbios de tensão ao longo de todo o sistema elétrico, podendo provocar danos irreparáveis ao sistema e às instalações das unidades consumidoras. A magnitude da corrente de curto-circuito depende de vários fatores, tais como: tipo de curto-circuito, capacidade do sistema de geração, topologia da

rede elétrica, tipo de aterramento do neutro dos equipamentos etc. (FREITAS; SATO, 2015).

Kindermann (1997) afirma que as principais causas dos curtos-circuitos em sistemas elétricos são as seguintes: falha na isolação, descargas atmosféricas direta ou indireta, sobrecorrentes devido à sobrecarga no sistema, falta de manutenção, atos de vandalismo, problemas mecânicos devido a ação do vento etc.

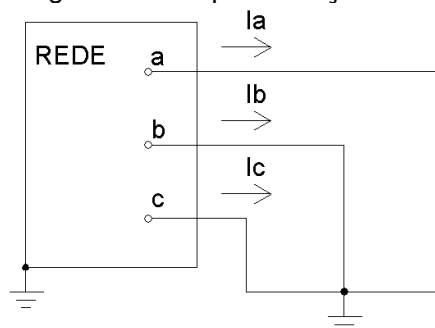
Para eliminar ou sanar as consequências do curto-circuito em um sistema elétrico, durante o projeto do sistema de proteção, deve-se as condições mais desfavoráveis às quais o sistema ser protegido poderá está submetido. Com isso, possibilita-se que os equipamentos de proteção mantenham sua integridade e garantam a segurança dos componentes e equipamentos elétricos bem como de seus usuários.

A seguir, os diferentes tipos de curtos-circuitos são modelados através do método das componentes simétricas.

4.5.1 Curto-circuito trifásico

O curto-circuito trifásico ocorre quando as três fases do sistema se conectam entre si, conforme mostra a Fig. 13. Esse tipo de evento possui pouca probabilidade de ocorrer. Entretanto, por ser o que apresenta consequências mais severas, deve ser sempre levado em consideração durante o dimensionamento dos dispositivos de proteção de um sistema trifásico.

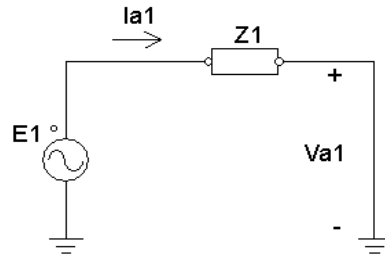
Figura 13 - Representação do curto-circuito trifásico.



Fonte: Adaptado de Zanetta, 2006.

O curto-circuito trifásico consiste de uma falta simétrica. Assim, apenas a rede de sequência apositiva possui força eletromotriz. A Fig. 14 representa o circuito de sequência positiva para análise da falta trifásica.

Figura 14 - Circuito equivalente para curto-circuito trifásico.



Fonte: Autoria própria, 2019.

Analisando o circuito da Fig. 14, tem-se que:

$$I_{cc,3\phi} = I_{a1} = \frac{E_1}{Z_1} \quad (29)$$

Em que:

$I_{cc,3\phi}$ - Corrente de curto-circuito trifásico;

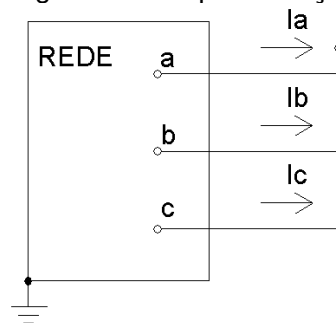
Z_1 - Impedância de sequência positiva, considerada desde a fonte até o ponto de falta analisado (equivalente de *Thevenin*);

E_1 - tensão de *Thevenin* no ponto da falta.

4.5.2 Curto-circuito bifásico

Esse tipo de curto-circuito envolve duas fases do sistema, como pode-se ser visto na Fig. 15. É importante frisar que I_a , I_b e I_c representam as correntes desequilibradas que fluem em direção ao ponto de falta.

Figura 15 - Representação do Curto-circuito bifásico.



Fonte: Adaptado de Zanetta, 2006.

Considerando uma falta bifásica envolvendo as fases a e b , nota-se que:

$$I_a = 0 \quad (30)$$

$$I_b = -I_c \quad (31)$$

$$V_b = V_c \quad (32)$$

Considerando as condições anteriores, pode-se encontrar as componentes simétricas dos fasores assimétricos das tensões da seguinte forma:

$$\begin{bmatrix} V_{a0} \\ V_{a1} \\ V_{a2} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \alpha & \alpha^2 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} V_a + V_b + V_c \\ V_a + V_b(\alpha + \alpha^2) \\ V_a + V_b(\alpha + \alpha^2) \end{bmatrix} \quad (33)$$

Assim, conclui-se que:

$$V_{a1} = V_{a2} \quad (34)$$

Considerando o fato de não haver caminho para o neutro, o que resulta em $I_{a0} = 0$, a Equação para as componentes simétricas dos fasores assimétricos das correntes será:

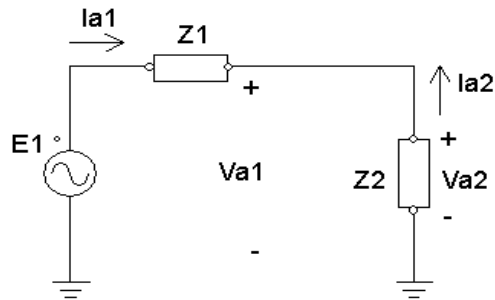
$$\begin{bmatrix} I_{a0} \\ I_{a1} \\ I_{a2} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \alpha & \alpha^2 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ -I_c \\ I_c \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 0 \\ I_c(\alpha^2 - \alpha) \\ I_c(\alpha - \alpha^2) \end{bmatrix} \quad (35)$$

Com isso:

$$I_{a1} = -I_{a2} \quad (36)$$

Através da análise das Eqs. 34 e 36, é possível representar a falta bifásica como mostra a da Fig. 16.

Figura 16 - Circuito equivalente para o curto-circuito bifásico.



Fonte: Autoria própria, 2019

Logo, pode-se determinar as expressões para as correntes I_{a1} e I_{a2} , como:

$$I_{a1} = \frac{E_1}{Z_1 + Z_2} \quad (37)$$

$$I_{a2} = -\frac{E_1}{Z_1 + Z_2} \quad (38)$$

Em que:

Z_1 e Z_2 - impedância de sequência positiva do equivalente de *Thevenin* até o ponto de falta.

Z_0 - impedância de sequência negativa do equivalente de *Thevenin* até o ponto de falta.

Das Eqs. 37 e 38, tem-se:

$$\begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \\ 1 & \alpha & \alpha^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{E_1}{Z_1 + Z_2} \\ -\frac{E_1}{Z_1 + Z_2} \end{bmatrix} \quad (39)$$

Considerando $Z_1 = Z_2$, tem-se:

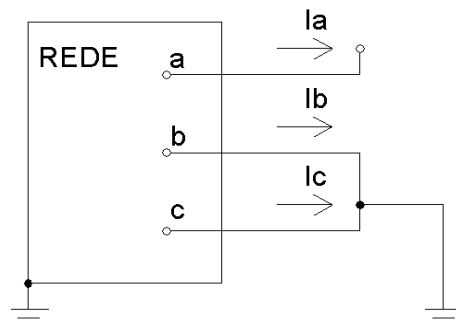
$$|I_{cc,2\phi}| = I_b = \frac{\sqrt{3}}{2} \frac{E_1}{Z_1} \quad (40)$$

Através da Eq. 40 verifica-se, portanto, que a corrente de curto-circuito bifásica ($I_{cc,2\phi}$) é menos severa do que a corrente de curto-circuito trifásica.

4.5.3 Curto-circuito bifásico-terra

No curto-circuito bifásico-terra duas fases mantêm contato direto com a terra, como mostra a Fig. 17.

Figura 17 - Representação do curto-circuito bifásico-terra.



Fonte: Adaptado de Zanetta, 2006.

Nesse caso, considerando uma falta bifásico-terra envolvendo as fases *a* e *b*, as seguintes condições são válidas:

$$I_a = 0 \quad (41)$$

$$V_b = 0 \quad (42)$$

$$V_c = 0 \quad (43)$$

Com isso, pode-se escrever que:

$$\begin{bmatrix} V_{a0} \\ V_{a1} \\ V_{a2} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \alpha & \alpha^2 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} V_a \\ V_a \\ V_a \end{bmatrix} \quad (44)$$

Assim, verifica-se que:

$$V_{a0} = V_{a1} = V_{a2} = \frac{1}{3} V_a \quad (45)$$

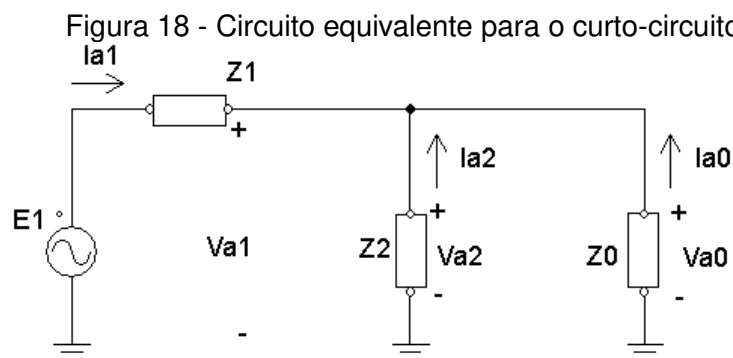
Com a corrente de falta que flui na fase *a* é nula, isto é, $I_a = 0$, pode-se escrever as componentes simétricas dos fasores de corrente dos sistemas da seguinte forma:

$$\begin{bmatrix} I_{a0} \\ I_{a1} \\ I_{a2} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \alpha & \alpha^2 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} I_b + I_c \\ \alpha I_b + \alpha^2 I_c \\ \alpha^2 I_b + \alpha I_c \end{bmatrix} \quad (46)$$

Com $I_a = 0$, pela Eq. 46, verifica-se que a soma de suas componentes simétricas é igualmente nula, isto é:

$$I_{a0} + I_{a1} + I_{a2} = 0 \quad (47)$$

Analisando as Eqs. 45 e 47, pode-se verificar que a rede de sequência para a falta bifásica-terra pode ser apresentada através do seguinte circuito mostrado na Fig. 18.



Fonte: Autoria própria, 2019.

Considerando $Z_1 = Z_2$, a corrente de sequência positiva (I_1) pode ser calculada através da Eq. 48.

$$I_{a1} = \frac{E_1}{Z_1 + Z_0 // Z_2} = \frac{E_1(Z_1 + Z_0)}{Z_1 Z_0 + Z_1 Z_2 + Z_0 Z_2} = \frac{(Z_1 + Z_0)}{(2Z_0 + Z_1)} \frac{E_1}{Z_1} \quad (48)$$

As correntes de sequência negativa (I_{a2}) e zero (I_{a0}) podem ser calculadas através das Equações 49 e 50, respectivamente.

$$I_{a2} = -I_{a1} \frac{Z_0}{Z_0 + Z_1} = -\frac{Z_0}{2Z_0 + Z_1} \frac{E_1}{Z_1} \quad (49)$$

$$I_{a0} = -I_{a1} \frac{Z_2}{Z_2 + Z_0} = -\frac{Z_1}{2Z_0 + Z_1} \frac{E_1}{Z_1} \quad (50)$$

Logo

$$\begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \alpha & \alpha^2 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -Z_1 \\ Z_1 + Z_0 \\ -Z_0 \end{bmatrix} \frac{E_1}{(2Z_0 + Z_1)Z_1} \quad (51)$$

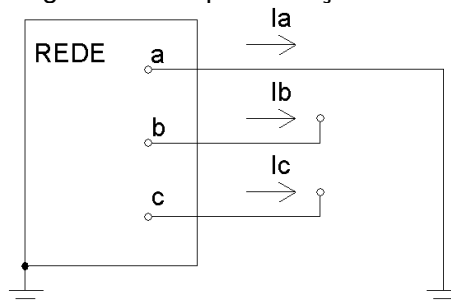
Portanto, a corrente de falta do curto-circuito bifásico-terra ($I_{cc,2\phi t}$) é igual a soma das correntes I_b e I_c , podendo ser valor ser calculado através da Eq. 52.

$$I_{cc,2\phi t} = \frac{3Z_1 E_1}{(2Z_0 + Z_1)Z_1} \quad (52)$$

4.5.4 Curto-circuito fase-terra

O curto-circuito fase-terra trata-se da falta mais comum em sistemas de potência. Como ilustrado na Figura 19, ela ocorre quando uma das fases do sistema elétrico entra em contato direto com a terra.

Figura 19 - Representação do curto-circuito fase-terra.



Fonte: Adaptado de Zanetta, 2006.

Nessa falta, tem-se as seguintes condições são verdadeiras:

$$I_b = 0 \quad (53)$$

$$I_c = 0 \quad (54)$$

As componentes simétricas das correntes de faltas podem ser escritas como:

$$\begin{bmatrix} I_{a0} \\ I_{a2} \\ I_{a1} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \alpha & \alpha^2 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} I_a \\ I_a \\ I_a \end{bmatrix} \quad (55)$$

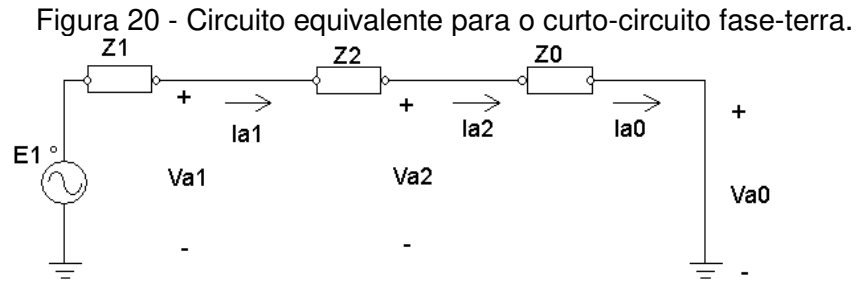
Assim:

$$I_{a0} = I_{a1} = I_{a2} = \frac{1}{3} I_a \quad (56)$$

Logo,

$$I_a = 3I_{a0} \quad (57)$$

Como as correntes de sequência são iguais, a representação da falta fase-terra através das componentes simétricas é feita conectando as redes de sequência positiva, negativa e zero em série, resultando na rede de sequência ilustrada na Fig 20.



Fonte: Autoria própria, 2019.

Assim, as correntes de sequência são iguais, podendo ser determinadas através da Eq. 47.

$$I_{a1} = I_{a2} = I_{a0} = \frac{E_1}{Z_1 + Z_2 + Z_0} \quad (58)$$

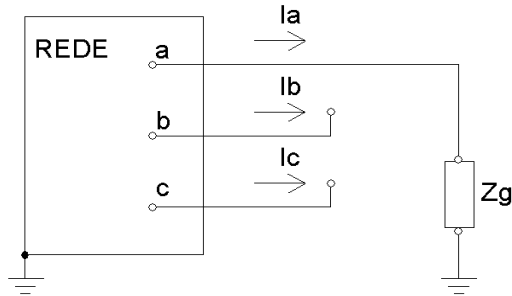
Considerando $Z_1 = Z_2$, pode-se calcular a corrente de curto-circuito fase-terra ($I_{cc,\phi t}$) através da Eq.48:

$$I_{cc,\phi t} = I_a = 3I_{a0} = \frac{3E_1}{2Z_1 + Z_0} \quad (59)$$

4.5.5 Curto-circuito fase-terra-mínimo

O curto-circuito fase-terra mínimo ocorre quando uma das fases do sistema elétrico entra em contato com a terra através de uma impedância de falta que, nesse caso, representa a própria resistência da aterra (Z_g). A Fig. 21 representa a falta fase-terra-mínima envolvendo a fase a .

Figura 21 - Representação do curto-circuito fase-terra mínimo.



Fonte: Adaptado de Zanetta, 2006.

Nessa falta, as seguintes condições são verdadeiras:

$$I_b = 0 \quad (60)$$

$$I_c = 0 \quad (61)$$

$$V_a = I_a Z_g \quad (62)$$

Portanto, é pode-se afirmar que a Equação 57 também é válida para curto-circuito fase-terra mínimo e as mesmas condições podem ser utilizadas para obter a rede de sequência para esse tipo de falta, logo:

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \alpha & \alpha^2 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{a0} \\ V_{a1} \\ V_{a2} \end{bmatrix} \quad (63)$$

Verifica-se, com base em Eq. 63, que:

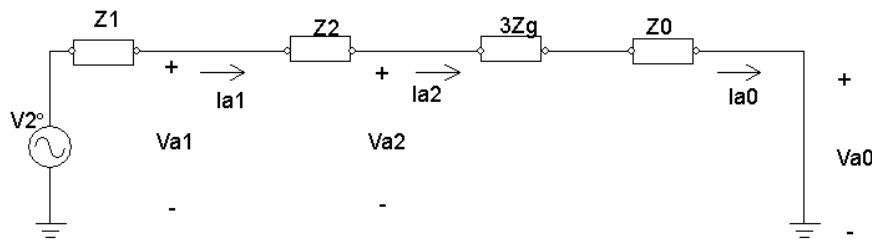
$$V_a = V_{a0} + V_{a1} + V_{a2} \quad (64)$$

Substituindo a Equação 63 na Equação 57, tem-se:

$$V_a = I_a Z_g = 3I_0 Z_g \quad (65)$$

Portanto, a rede de sequência pode ser representada como ilustrado na Fig.

Figura 22 - Circuito equivalente para o curto-circuito fase-terra mínimo.



Fonte: Autoria própria, 2019.

Considerando $Z_1 = Z_2$, a corrente de curto-circuito fase-terra mínimo ($I_{cc,\phi t-m}$) pode ser determinada através da Equação 66.

$$I_{cc,\phi t-m} = I_a = 3 I_{a0} \quad (66)$$

Onde:

$$I_{a0} = \frac{E_1}{Z_0 + 2Z_1 + 3Z_g} \quad (67)$$

Portanto:

$$I_{cc,\phi t-m} = \frac{3E_1}{Z_0 + 2Z_1 + 3Z_g} \quad (68)$$

De acordo com Kindermann (1997), existe uma dificuldade em obter o valor de Z_g . No Brasil, por existir solos com características bastante diferentes, as concessionárias podem estabelecer valores próprios de impedância de terra para o ponto de falta analisado.

4.6 Corrente assimétrica

As correntes de curto-circuito são compostas de duas parcelas, uma simétrica e outra assimétrica. Os valores assimétricos das correntes de curtos-circuitos são empregados para determinação da capacidade de ruptura ou interrupção dos dispositivos de proteção (ALMEIDA; 2000). Por outro lado, os valores simétricos são utilizados nas etapas de coordenação e seletividade entre os dispositivos de proteção.

Segundo Mamede (2010), para determinar a intensidade da corrente assimétrica (I_{ass}), é necessário conhecer o fator de assimetria (FA), cujos valores variam em função do tempo e depende da constante de circuito (τ). Também é necessário conhecer o valor simétrico da corrente de curto-circuito (I_{cc}), podendo ser

determinado, para os diferentes tipos de faltas, através das equações vistas na seção anterior. As Eqs. 69, 70 e 71 representam, respectivamente, o cálculo da corrente assimétrica, o fator de assimétrica e a constante do circuito.

$$I_{ass} = I_{cc} FA \quad (69)$$

$$FA = \sqrt{1 + 2 * e^{\frac{-\omega t}{\tau}}} \quad (70)$$

$$\tau = \frac{X}{R} \quad (71)$$

Em que X e R são, respectivamente, a reatância e resistência acumulada até o ponto de falta. Para o cálculo das correntes assimétricas, considera-se o valor da corrente em 1/4 do ciclo total, isto é, o valor máximo do período.

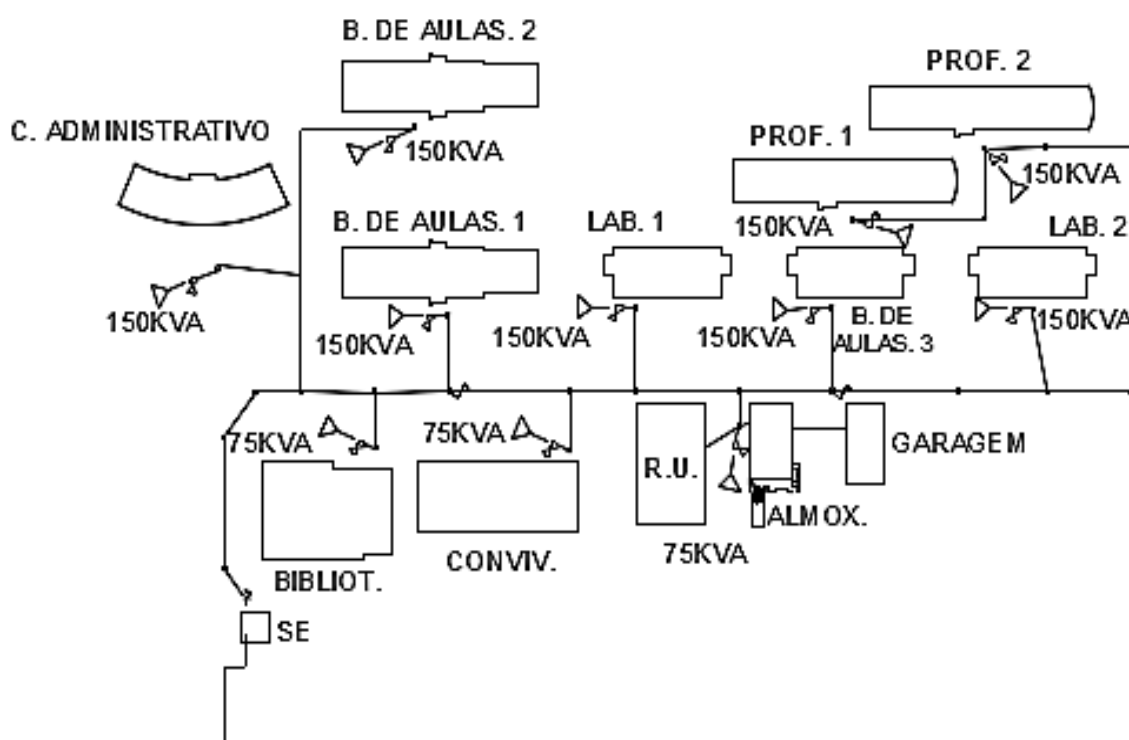
5 RESULTADOS

A seguir são obtidos parâmetros coletados e calculados necessários para a análise do estudo de proteção de rede interna da UFERSA – Caraúbas.

5.1 Subestação da Ufersa - Caraúbas

A rede de distribuição interna da UFERSA - Caraúbas é alimentada em 13,8 kV sendo que esse nível é rebaixado para 220-380 V através de transformadores de força convenientemente instalados na entrada dos blocos de aula e/ou professores. A Fig. 23 ilustra o posicionamento de cada transformador presente no campus.

Figura 23 - Rede de distribuição da UFERSA -Caraúbas.



Fonte: Autoria Própria, 2019

Como pode ser verificado na Fig. 23, a rede interna de média tensão da UFERSA-Caraúbas possui 11 transformadores, sendo 8 com potência nominal de 150 KVA e 3 com potência nominal de 75 KVA, o que resulta em uma carga instalada de 1.425 KVA.

A subestação da UFERSA – Caraúbas, é de característica definitiva, utiliza materiais incombustíveis, oferecendo condições de bem-estar e segurança. A Fig. 24

mostra a subestação da UFERSA - Caraúbas. A norma NOR.DISTRIBU-ENGE-0023 - Fornecimento de Energia Elétrica em Média Tensão de Distribuição à Edificação Individual (2017), determina que, quando a capacidade instalada da subestação for 225 kVA na tensão de 220/127 V ou 300 kVA na tensão de 380/220 V, a medição de energia elétrica para fornecimento em tensão primária de distribuição, seja realizada no circuito primário.

Figura 24 - Subestação da UFERSA – Caraúbas.



Fonte: Autoria própria, 2019.

Para realizar a medição são usados 3 TPs (1 para cada fase) e 3 TCs (1 para cada fase). As Figuras 25 a) e b) mostram os TPs e TCS instalados na subestação da UFERSA-Caraúbas.

Figura 25 - TCs e TPs instalados na subestação da UFERSA – Caraúbas.



(a) TCs



(b) TPs

Fonte: Autoria própria, 2019.

Ainda de acordo com a norma NOR.DISTRIBU-ENGE-0023 (2017), deve ser instalada chave seccionadora tripolar com alavanca de manobra após a medição e antes do disjuntor geral, destinada a identificação visual do desligamento em caso de manutenção nos equipamentos de medição. A Figura 26 mostra a chave seccionadora instalada na subestação da UFERSA - Caraúbas.

Figura 26 - Chave sec. - UFERSA - Caraúbas.



Fonte: Autoria própria, 2019.

Se a subestação possuir potência instalada acima de 300 kVA, a norma NOR.DISTRIBU-ENGE-0023 (2017), exige utilizar um disjuntor de média tensão, acionado por relés secundários, com no mínimo a função instantânea de fase 50 e com a função temporizada de fase 51, e capacidade de interrupção compatível com os níveis de curto-circuito possíveis de ocorrer no ponto de instalação. A Fig. 27 mostra o disjuntor equipado com relé instalado na subestação da UFERSA - Caraúbas.

Figura 27 - Disj. equipado com relé - UFERSA – Caraúbas.



Fonte: Autoria própria, 2019.

5.2 Dados coletados

Para o desenvolvimento do estudo, faz-se necessário o conhecimento de algumas características elétricas no de entrega do consumidor, tais como, impedância de sequência, níveis de curtos-circuitos e ajustes do relé da concessionária. Esses dados são, normalmente, mediante solicitação, fornecidos pela concessionária de energia elétrica local (Concessionária de Energia Elétrica do Rio Grande do Norte - COSERN). Entretanto, os dados citados foram obtidos através de Bandeira (2017), que desenvolveu o projeto de coordenação e seletividade entre o relé da concessionária e o relé instalado na subestação da UFERSA-Caraúbas. Na Tab. 5 contém os dados obtidos em Bandeira (2017).

Tabela 5 - Dados fornecidos pela COSERN.

Dados fornecidos pela CCEE/IN:		
Níveis de curto-circuito		
Trifásico	1103,11 A	
Bifásico	955,32 A	
Fase-terra	588,45 A	
Fase-terra mínimo	175,90 A	
Impedâncias reduzidas no ponto de entrega		
Z1	1,3595 + j3,5406 pu	
Z0	2,5656 + j13,5829 pu	
Tensão de base	13,8 kV	
Potência de base	100 MVA	
Ajustes do relé associado ao religador 21Y2-AAA, no alimentador AAA-01Y2		
RTC	600:5	
Relé	Fase	Neutro
Unidade 51	TAP 3 A 0,1	TAP 0,5 A 0,2
Curva	NI IEC	NI IEC
Unidade 50	TAP 22 A 0,06	TAP 6,6 A 0,06
Tempo	s	s
Neutro sensível (Unidade 51Ns)	TAP 0,10 A (secundário) 6,0 s	

Fonte: Bandeira, 2017.

A Figura 28 mostra o diagrama unifilar da rede interna de média tensão da UFERSA-Caraúbas. Através dessa figura, é possível identificar o posicionamento dos transformadores, os pontos de determinação dos níveis de curto-circuito e as especificações dos cabos.

A Tab. 6 mostra o comprimento e o tipo de condutor utilizado em cada trecho do alimentador da rede interna de média tensão da UFERSA-Caraúbas. Essas informações serão utilizadas para verificar se a curva de fusão dos cabos está acima da curva de tempo máximo de fusão dos elos-fusíveis. Além disso, através dessas é possível determinar as impedâncias de sequência positiva, negativa e zero. A Fig. 28 mostra o diagrama unifilar da instalação, identificando que tipo de condutor é utilizado em cada trecho.

Tabela 6 - Tipo de condutor e distâncias entre os pontos.

Trecho	Distância (m)	Tipo de cabo
SE-1	88	AWG-1/0-CAA
1-2	39	AWG-1/0-CAA
2-3	30	AWG-4-CAA
2-4	91	AWG-4-CAA
1-5	27	AWG-1/0-CAA
5-6	18	AWG-4-CAA
5-7	28	AWG-1/0-CAA
7-8	27	AWG-4-CAA
7-9	43	AWG-1/0-CAA
9-10	18	AWG-4-CAA
9-11	24	AWG-1/0-CAA
11-12	27	AWG-4-CAA
11-13	39	AWG-1/0-CAA
13-14	10	AWG-4-CAA
13-15	33	AWG-1/0-CAA
15-16	27	AWG-4-CAA
15-17	78	AWG-1/0-CAA
17-18	27	AWG-4-CAA
17-19	166	AWG-1/0-CAA
19-20	70	AWG-4-CAA

Fonte: Autoria própria, 2019.

Com o tipo de cabo e a distância entre os trechos conhecidas, é possível determinar a impedância de cada trecho definido, para tanto, deve-se somar a impedância do trecho considerado com a impedância equivalente no ponto de entrega. Entretanto, para que a soma possa ser corretamente realizada deve-se, primeiramente, obter a impedância de base do sistema, como mostrado na Eq. 72 é necessário transformar as impedâncias de sequência dos trechos (Z_{trecho}) em valores por unidade (PU), para isso basta dividir a impedância considerada pela impedância de base (Z_{base}), definida pela relação da tensão de base (V_{base}) com a potência de base (S_{base}), da seguinte forma:

$$Z_{\text{base}} = \frac{V_{\text{base}}^2}{S_{\text{base}}} = \frac{(13,8 \times 10^3)^2}{(100 \times 10^6)} = 1,904 \, \Omega \quad (72)$$

Assim, a impedância em valores por unidade (Z_{pu}) em cada trecho será:

$$Z_{pu} = \frac{Z_{trecho}}{1,904} \text{ (pu)} \quad (73)$$

A Tabela 7 informa os valores das impedâncias de sequência por unidade de comprimento para diferentes tipos de cabos CAA (Cabo de Alumínio com Alma de Aço).

Tabela 7 - Impedância de cabos CAA.

SEÇÃO	COMPONENTE DE IMPEDÂNCIA DE SEQUÊNCIA POSITIVA E NEGATIVA (Ω/Km)		COMPONENTE DE IMPEDÂNCIA DE SEQUÊNCIA ZERO s/ neutro MULTI-ATERRADO (Ω/Km).	
	$R_1 = R_2$	$X_1 = X_2$	R_0	X_0
4/0	0,368	0,475	0,545	1,932
3/0	0,449	0,498	0,626	1,955
2/0	0,556	0,510	0,733	1,967
1/0	0,696	0,520	0,873	1,978
2	1,050	0,525	1,227	1,982
4	1,597	0,522	1,774	1,987

Fonte: Adaptado de Kindermann, 1997.

A Tab. 8 mostra as impedâncias de sequências positiva, negativa e zero em pu, para cada trecho da rede interna de média tensão da UFERSA-Caraúbas.

Tabela 8 - Impedâncias entre trechos.

Trecho	$Z_{1-pu} = Z_{2-pu}$ (pu)	Z_0 pu (pu)
SE-1	0.0322 + 0.0240i	0.0403 + 0.0916i
1-2	0.0143 + 0.0106i	0.0179 + 0.0406i
2-3	0.0252 + 0.0082i	0.0279 + 0.0312i
2-4	0.0763 + 0.0249i	0.0848 + 0.0946i
1-5	0.0099 + 0.0074i	0.0124 + 0.0281i
5-6	0.0151 + 0.0049i	0.0168 + 0.0187i
5-7	0.0102 + 0.0076i	0.0128 + 0.0291i
7-8	0.0226 + 0.0074i	0.0252 + 0.0281i
7-9	0.0157 + 0.0117i	0.0197 + 0.0448i
9-10	0.0151 + 0.0049i	0.0168 + 0.0187i
9-11	0.0088 + 0.0066i	0.0110 + 0.0250i
11-12	0.0226 + 0.0074i	0.0252 + 0.0281i
11-13	0.0143 + 0.0106i	0.0179 + 0.0406i
13-14	0.0084 + 0.0027i	0.0093 + 0.0104i
13-15	0.0121 + 0.0090i	0.0151 + 0.0343i
15-16	0.0226 + 0.0074i	0.0252 + 0.0281i
15-17	0.0285 + 0.0213i	0.0358 + 0.0812i
17-18	0.0226 + 0.0074i	0.0252 + 0.0281i
17-19	0.0607 + 0.0453i	0.0761 + 0.1728i
19-20	0.0587 + 0.0192i	0.0652 + 0.0727i

Fonte: Autoria própria, 2019.

A seguir, será abordada a metodologia para determinação dos níveis de curto-circuito.

5.3 Correntes de curto-circuito

Para o cálculo das correntes de curto-circuito deve, primeiramente, determinar o valor da corrente de base (I_{base}) através da Eq. 74 e usando os dados contidos na Tab. 5, isto é:

$$I_{base} = \frac{S_{base}}{\sqrt{3} * V_{base}} = \frac{100 \times 10^6}{\sqrt{3} * 13,8 \times 10^3} = 4\,183,7\,A \quad (74)$$

Para o cálculo das correntes de curto-circuito fase-terra mínimo, considera-se que a impedância da terra é dada por $Z_g = 100/3\,\Omega$

Para o cálculo de todas as correntes de curto-circuito é considerado a impedância de sequência positiva igual à impedância de sequência negativa. Os valores das impedâncias de sequência e dos níveis de curto-circuito assimétricos estão apresentados na Tab. 9. A seguir, os cálculos das correntes de curto-circuito e assimétricas:

O cálculo dos níveis de curto-circuito pode ser realizado através da seguinte metodologia:

1. Calcula-se o valor do curto-circuito trifásico no ponto analisado utilizando a Eq. 29, a tensão do sistema em pu ($E_1 = 1\,pu$) e os dados contidos na Tab. 8;
2. Calcula-se o valor do curto-circuito bifásico no ponto analisado utilizando a Eq. 40, a tensão do sistema em pu ($E_1 = 1\,pu$) e os dados contidos na Tab. 8;
3. Calcula-se o valor do curto-circuito bifásico-terra no ponto analisado utilizando a Eq. 52, a tensão do sistema em pu ($E_1 = 1\,pu$) e os dados contidos na Tab. 8;
4. Calcula-se o valor do curto-circuito fase-terra no ponto analisado utilizando a Eq. 59, a tensão do sistema em pu ($E_1 = 1\,pu$) e os dados contidos na Tab. 8;
5. Calcula-se o valor do curto-circuito fase-terra-mínimo no ponto analisado utilizando a Eq. 68, a tensão do sistema em pu ($E_1 = 1\,pu$) e

os dados contidos na Tab. 8;

6. Determina-se os níveis de curto-circuito assimétrico multiplicando o FA, obtido através da Eq. 69, pelo valor da componente simétrica, determinado das etapas anteriores;

Utilizando a metodologia anterior, determinou-se os valores dos níveis de curto-circuito em todos os pontos da Fig. 29.

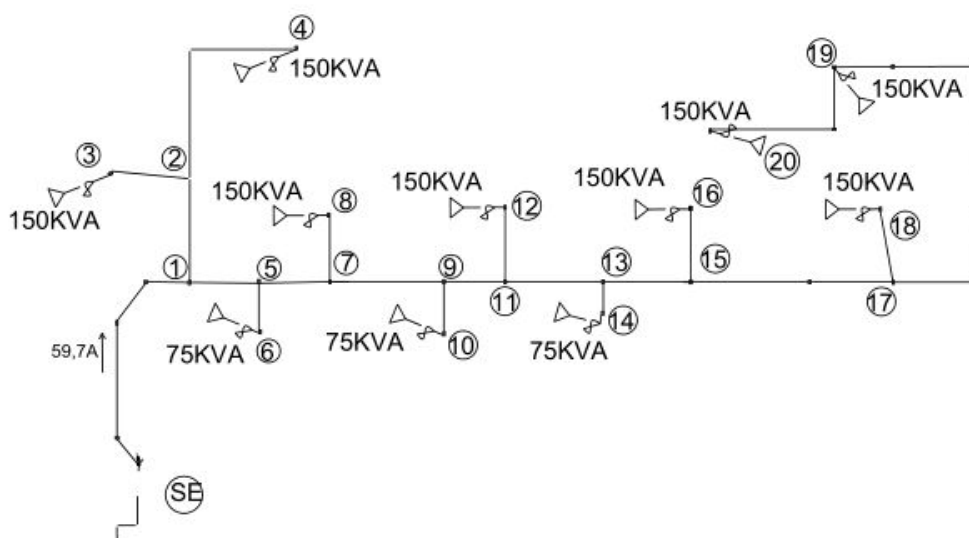
Tabela 9 - Correntes de curto-circuito e correntes assimétricas.

	$I_{cc,3\phi}$ (A)		$I_{cc,2\phi}$ (A)		$I_{cc,2\phi t}$ (A)		$I_{cc,\phi t}$ (A)		$I_{cc,\phi t-m}$ (A)	
	$I_{cc,3\phi}$	$I_{cc,3\phi \text{ ass}}$	$I_{cc,2\phi}$	$I_{cc,2\phi \text{ ass}}$	$I_{cc,2\phi t}$	$I_{cc,2\phi t \text{ ass}}$	$I_{cc,\phi t}$	$I_{cc,\phi t \text{ ass}}$	$I_{cc,\phi t-m}$	$I_{cc,\phi t-m,as}$
1	1093,3	1377,1	946,8	1192,9	397,1	500,3	584,1	735,9	116,8	147,2
3	1084,2	1355,3	938,8	1172,5	394,7	492,5	580,3	725	116,7	145,9
4	1074,3	1332,1	930,6	1153,2	392,6	486,8	576,7	715,1	116,7	144,7
6	1087,4	1359,3	941,7	1177,1	395,5	494,3	581,6	727	116,7	145,7
8	1082,9	1353,6	937,9	1172,3	394,3	492,8	579,3	724,1	116,7	145,9
10	1079,1	1348,8	935,1	1168,8	393,3	491,6	578,1	722,6	116,6	145,8
12	1075,7	1343,7	931,6	1164,5	392,2	490,25	576,4	720,5	116,6	145,7
14	1074,1	1342,7	930,3	1162,8	391,6	489,5	575,5	719,3	116,6	145,7
16	1067,9	1324,2	924,9	1146,8	389,9	483,5	572,9	710,3	116,5	144,5
18	1059,6	1313,9	917,6	1137,8	387,5	480,5	569,2	705,8	116,3	144,2
19	1046,5	1287,1	906,3	1114,7	383,7	471,9	562,9	703,6	115,9	142,6
20	1035,9	1263,8	897,2	1094,5	381,4	464,8	559,0	681,9	115,7	141,2

Fonte: Autoria própria, 2019.

A Fig. 29 mostra uma versão simplificada da localização geometria de todos os pontos cujos níveis de curto-circuito estão apresentados na Tab.

Figura 29 - Identificação dos pontos de cálculo dos níveis de curto-circuito na rede interna de média tensão da UFERSA-Caraúbas.



Fonte: Autoria própria, 2019.

5.4 Dimensionamento dos elos e chaves fusíveis

A seguir serão apresentados os cálculos referentes ao dimensionamento de todos os dispositivos que serão utilizados para a proteção da rede interna de média tensão da UFERSA-Caraúbas.

5.4.1 Dimensionamento de elos-fusíveis

A corrente nominal dos transformadores pode ser obtida por:

$$I_n = \frac{S_{3\phi}}{\sqrt{3} * V_L} \quad (75)$$

Onde:

I_n – Corrente nominal do transformador;

$S_{3\phi}$ - Potência do transformador;

V_L – Tensão de linha da rede.

Assim, utilizando a Eq. 75, obteve as seguintes correntes nominais: 3,1 A (transformador de 75 KVA:) e 6,2 A (transformador de 150 KVA).

Utilizando o requisito a), do dimensionamento de elos-fusíveis quando aplicados à proteção de transformadores, tem-se que o elo-fusível dos transformadores de 75 KVA, será:

$$I_{\text{nom.-elo,75KVA}} \geq 1,5 * 3,1$$

$$I_{\text{nom.-elo,75KVA}} \geq 4,7 \text{ A}$$

$$I_{\text{nom.-elo,75KVA}} = 5 \text{ A}$$

Portanto, seleciona-se o elo 5H para proteger os transformadores de 75 kVA.

A corrente nominal do elo-fusível utilizado para proteger os transformadores de 150 KVA, pode ser calculado como mostrado abaixo.

$$I_{\text{nom.-elo,150KVA}} \geq 1,5 * 6.2$$

$$I_{\text{nom.-elo,150KVA}} \geq 9,3 \text{ A}$$

$$I_{\text{nom.-elo,150KVA}} = 10 \text{ A}$$

Utilizando o resultado anterior, poderia utilizar o elo-fusível de 10K. Entretanto, os elos tipo K são, normalmente, projetados para operar com sobrecarga máxima de 50% acima de seu valor nominal, isto é, sua corrente admissível é $1,5 \cdot I_{\text{nom.-el}}$. Desse modo, uma vez que a sobrecarga máxima admissível para o transformador de 150 KVA é 50%, que resulta em uma corrente de 9,3 A, pode-se selecionar o elo-fusível 8K, cuja corrente admissível, de acordo com a Tabela 3, é 12 A, valor superior a sobrecarga máxima considerada para o transformador (9,3A). É importante destacar, que o uso de elos com valores elevados dificulta a coordenação com os dispositivos de proteção a montante.

Para verificar a condição b.1) para dimensionamento de elos-fusíveis para proteção de circuitos primários, não será considerado as correntes de curto-circuito fase fase-terra mínimo, pois seus valores ao longo do alimentador são relativamente pequenos e não variam muito. Desse modo, não é possível realizar o dimensionamento do sistema de proteção com base nesse nível de curto-circuito, assim, serão utilizados os valores de correntes do curto-circuito fase terra.

Para determinar o elo-fusível no ponto 15 (E_{15}) deve-se utilizar a corrente de carga nesse ponto (18,6 A). Assim, a corrente nominal do elo-fusível para o ponto 15 deve satisfazer as seguintes condições:

$$I_{\text{nom.-Elo15}} \geq 1,5 \cdot 18,6$$

$$I_{\text{nom.-Elo15}} \geq 28 \text{ A}$$

e

$$I_{\text{nom.-Elo15}} \leq \frac{1}{4} \cdot 559$$

$$I_{\text{nom.-Elo15}} \leq 140 \text{ A}$$

Analisando os resultados anteriores, pode-se utilizar um elo-fusível 20K, cuja corrente admissível, de acordo com a Tabela 3, é 22,5 A. O elo nesse ponto (elo protegido) deve coordenar com o elo de 8K (ponto 18) pelo menos para a corrente de curto-circuito fase-terra no ponto 18 (569,2 A), de acordo com a Tabela 2, verifica-se que o elo protegido coordena com o elo 8K até o limite de 650 A, atendendo ao requisito proposto.

Para a corrente de curto-circuito trifásica no ponto 15, verifica-se, com base nas Figs. 9 e 10, que o tempo de interrupção do elo 20K (inferior à 0,050s) é muito

menor que o tempo de fusão do cabo 1/0 AWG CAA (superior à 20s), assim, o elo 20K protege o cabo de alumínio para o trecho analisado.

O ponto 7 possui a corrente de carga de 37,2 A, assim, a corrente nominal do elo nesse ponto (E_7), deve obedecer aos seguintes requisitos:

$$I_{\text{nom.-elo}} \geq 1,5 * 37,2$$

$$I_{\text{nom.-elo}} \geq 55,8 \text{ A}$$

e

$$I_{\text{nom.-elo}} \leq \frac{1}{4} * 579,3$$

$$I_{\text{nom.-elo}} \leq 145 \text{ A}$$

Será selecionado o elo-fusível 40K, cuja corrente admissível, de acordo com a Tabela 3, é 60 A. O elo nesse ponto (protegido), deve coordenar com o elo de 20K pelo menos para a corrente de curto-circuito fase-terra no ponto 15. De acordo com a Tabela 2, verifica-se que o elo protegido coordena com o elo 20K até o limite de 1100 A, atendendo ao requisito proposto.

Para a corrente de curto-circuito trifásica no ponto de instalação do elo 40K, verifica-se, com base nas Figs 9 e 10, que o tempo de interrupção é inferior à 0,1s, valor muito menor que o tempo de fusão do cabo 1/0 AWG CAA (superior à 20s). Assim, o elo 40K protege o cabo de alumínio para o trecho analisado.

Para o elo da saída subestação (E_{SE}) a corrente de carga é de 59,7 A, assim, a corrente nominal do elo nesse ponto, deve obedecer aos seguintes requisitos:

$$I_{\text{nom.-elo}} \geq 1,5 * 59,7$$

$$I_{\text{nom.-elo}} \geq 89,5 \text{ A}$$

e

$$I_{\text{nom.-elo}} \leq \frac{1}{4} * 588,5$$

$$I_{\text{nom.-elo}} \leq 147 \text{ A}$$

O elo-fusível nesse ponto deve coordenar com o elo 40K (protetor) até, pelo menos, o curto-circuito fase-terra no ponto de sua instalação (ponto 7). Assim, seleciona-se o elo 65K, cuja corrente admissível, de acordo com a Tabela 3, tem o valor de 97,5 A, e coordena com elo 40K até o limite de 1100 A. Esse elo-fusível

também protege o cabo 1/0 AWG CAA, pois, de acordo as Figs. 9 e 10, seu tempo de atuação é inferior ao tempo de fusão do cabo.

3.4.1.1 Corrente de magnetização dos transformadores.

Esse item objetiva verificar se os elos fusíveis selecionados anteriormente irão ou não atuar para as correntes de magnetização dos transformadores instalados na rede interna de média tensão da UFERSA-Caraúbas.

- Elo-fusível da saída da subestação (65K)

Da Eq. 18, tem-se:

$$I_{\text{mag-elo}} = 8 * 59,7 = 477,6 \text{ A}$$

Com base na Fig. 10, verifica-se que elo 65K não atuará para essa corrente de magnetização, pois o tempo de interrupção do elo (superior a 0,5s) é superior ao tempo de duração da corrente de magnetização (0,1s)

- Elos-fusíveis para transformadores de 75 KVA (5H)

Da Equação 18, tem-se:

$$I_{\text{mag-elo}} = 8 * 3,1 = 24,8 \text{ A}$$

Com base na Fig. 11, verifica-se que os elos 5H não atuarão para essa corrente de magnetização, pois seu tempo de fusão (aproximadamente 1,5s) é superior ao tempo de duração da corrente de magnetização (0,1s)

- Elos-fusíveis para transformadores de 150 KVA (8K)

Da Eq. 18, tem-se:

$$I_{\text{mag-elo}} = 8 * 6,2 = 49,6 \text{ A}$$

Com base na Fig. 10, verifica-se que os elos 8K não atuarão para essa corrente de magnetização, pois seu tempo de fusão (menor que 1s) é superior ao tempo de duração da corrente de magnetização (0,1s).

- Elo-fusível do ponto 7 (40K)

Da Equação 18, tem-se:

$$I_{\text{mag-elo}} = 8 * 37,2 = 297,6 \text{ A}$$

Com base na Fig. 10, verifica-se que o elo 40K não atuará para essa corrente de magnetização. pois seu tempo de fusão (próximo de 0,7s) é superior ao tempo de duração da corrente de magnetização (0,1s).

- Elo-fusível do ponto 15 (20K)

Da Equação 18, tem-se:

$$I_{\text{mag-elo}} = 8 * 18,6 = 148,8 \text{ A}$$

Com base na Fig. 10, verifica-se que o elo 20K não atuará para essa corrente de magnetização, pois seu tempo de fusão (aproximadamente 1s) é superior ao tempo de duração da corrente de magnetização (0,1s)

Assim, conclui-se que todos os elos-fusíveis selecionados não irão atuar para as correntes de magnetização dos transformadores, característica essa desejada para o correto funcionamento da rede de alimentação do campus.

5.4.2 Dimensionamento das chaves fusíveis

De acordo com os critérios de dimensionamento e as Tabs. 3 e 4, as chaves fusíveis devem ter as seguintes características:

- Corrente nominal: 200 A
- Capacidade de interrupção: 2 kA;
- Tensão nominal: 13,8 kV;
- Classe de tensão: 15 kV;
- NBI: 110 kV

5.6 Relé de entrada da UFERSA – Caraúbas

A seguir serão obtidos os ajustes do relé de entrada da UFERSA – Caraúbas:

5.6.1 Dimensionamento do TC

De acordo com a Equação 19, tem-se:

$$I_{\text{nom.},\text{PTC}} \geq \frac{1425 \text{ KVA}}{\sqrt{3} * 13,8 \text{ KV}}$$

$$I_{\text{nom.},\text{PTC}} \geq 59,61 \text{ A}$$

Além disso, a corrente nominal do primário do TC deve satisfazer a seguinte condição:

$$I_{\text{nom.},\text{PTC}} \geq \frac{1103,11}{20}$$

$$I_{\text{nom.},\text{PTC}} \geq 55,2 \text{ A}$$

Portanto, seleciona-se um TC com RTC = 75:5 ou 15:1.

5.6.2 Proteção de fase - Unidade 51F

A corrente de ajuste da unidade 51F do relé da UFERSA ($I_{aj.51F,UFERSA}$), pode ser obtida através da Equação 2, assim:

$$I_{aj.51F,UFERSA} = \frac{1,2 * 59,7}{15}$$

$$I_{aj.51F,UFERSA} = 4,8 \text{ A}$$

A corrente de atuação ($I_{at.51F,UFERSA}$) é dada pela Equação 3, logo:

$$I_{at.51F,UFERSA} = 4,8 * 15$$

$$I_{at.51F,UFERSA} = 72 \text{ A}$$

O relé da subestação deve operar como proteção de retaguarda do elo-fusível 65K. Assim, deve ser sensível a corrente de falta no ponto 1. Da Eq.5, tem-se:

$$M_{Fase} = \frac{1093,26}{15 * 4,8}$$

$$M_{Fase} = 15,18$$

Onde M_{Fase} é o múltiplo da corrente de acionamento da unidade 51F.

O relé opera coordenado com o elo quando existe uma defasagem mínima de 0,2 s entre as suas respectivas operações, ou seja:

$$t_{rele} \geq t_{elo65k} + 0,2$$

Em que:

t_{rele} - Tempo de operação do relé;

t_{elo65k} - Tempo de operação do elo.

Para a corrente de 1093,26 A, de acordo com a Fig. 10, o elo de 65K atua em tempo máximo de, aproximadamente, 0,15 s. Com isso, tem-se que:

$$t_{rele} \geq 0,35s$$

Da Eq. 4, pode-se determinar a TMS mais adequada como mostrado abaixo:

$$TMS_{fase} = \frac{0,35(15,18^{0,02} - 1)}{0,14} = 0,14$$

5.6.3 Proteção de fase - Unidade 50F

A corrente de ajuste da unidade 50F é dada pela Eq. 6, assim:

$$I_{aj.50F,UFERSA} = I_{aj.51F,UFERSA} * F$$

Em que:

$I_{aj.50F,UFERSA}$ - corrente de ajuste da unidade 50F do relé da UFERSA;

$I_{aj.51F,UFERSA}$ - corrente de ajuste da unidade 51F do relé da UFERSA;

É desejável que:

$$F < \frac{I_{cc,3\phi,ass}}{I_{aj.51F,UFERSA}}$$

$$F < \frac{1377,11}{72}$$

$$F < 19$$

Selecionando F=15, tem-se:

$$I_{aj.50F,UFERSA} = 4,8 * 15$$

$$I_{aj.50F,UFERSA} = 72 \text{ A}$$

Logo, a corrente de atuação da unidade 50F é dada pela Eq. 8:

$$I_{at.50F,UFERSA} = 72 * 15$$

$$I_{at.50F,UFERSA} = 1080 \text{ A}$$

Para que a unidade 50F não atue para as correntes de magnetização, sua corrente deve ser maior que o somatório de todas as correntes de magnetização dos transformadores existente no alimentador, isto é:

$$I_{at.50F,UFERSA} \geq I_{mag}$$

$$1080 \geq 477,6 \text{ A}$$

Portanto, verifica-se que o relé não irá atuar para as correntes de magnetização dos transformadores existente no alimentador.

5.6.4 Proteção de neutro - Unidade 51N

A corrente de ajuste da unidade 51N do relé da UFERSA ($I_{aj.51N,UFERSA}$), pode ser obtida pela Equação 9, assim:

$$I_{aj.51N,UFERSA} = \frac{0,2 * 59,7}{15}$$

$$I_{aj.51N,UFERSA} = 0,8 \text{ A}$$

A corrente de atuação ($I_{at.51N,UFERSA}$) é dada pela Equação 10, portanto:

$$I_{at.51N,UFERSA} = 0,8 * 15$$

$$I_{at.51N,UFERSA} = 12 \text{ A}$$

O múltiplo da corrente de acionamento da unidade 51N (M_{Neutro}) é obtido considerando o menor valor de curto-circuito fase-terra do alimentador. De acordo com Eq. 11 tem-se:

$$M_{Neutro} = \frac{559}{15 * 0,8}$$

$$M_{neutro} = 46,6$$

Para a corrente de curto-circuito fase-terra de 559 A (ponto 20), de acordo com a Fig.10, o fusível 20K atua em um tempo máximo de 0,08s, assim, para que o relé atue como retaguarda do elo 20K, ele deve ter seu tempo de atuação igual a:

$$t_{at51N} = t_{elo25K} + 0,2$$

Onde:

t_{elo30k} - Tempo de atuação do elo;

t_{at51N} - Tempo de atuação do relé.

Portanto:

$$t_{at51N} = 0,28s$$

A partir da Eq. 4 pode-se determinar a TMS mais adequada como mostrado abaixo:

$$TMS_{neutro} = \frac{0,28(46,6^{0,02} - 1)}{0,14} = 0,16s$$

Também é necessário verificar a suportabilidade térmica do cabo 4 AWG CAA para a corrente de curto-circuito fase terra de 559 A. Verifica-se, com base na Fig. 9, que para a corrente de 559 A o tempo máximo de fusão do cabo 4 AWG CAA é superior 20s. Portanto, o relé protege o cabo citado.

5.6.5 Proteção de neutro - Unidade 50N

A corrente de ajuste da unidade 50F é dada pela Equação 12, assim:

$$I_{aj.50N,UFERSA} = I_{aj.51N,UFERSA} * F$$

Em que:

$I_{aj.50N,UFERSA}$ - corrente de ajuste da unidade 50N do relé da UFERSA;

$I_{aj.51N,UFERSA}$ - corrente de ajuste da unidade 51N do relé da UFERSA;

É desejável que:

$$F < \frac{I_{cc,\phi t}}{I_{aj.51N}}$$

$$F < \frac{559}{12}$$

$$F < 10$$

Selecionando $F=30$, tem-se:

$$I_{aj.50N,UFERSA} = 10 * 0,8$$

$$I_{aj.50N,UFERSA} = 8 A$$

Logo a corrente de atuação da unidade 50F é dada pela Equação 14:

$$I_{at.50N,UFERSA} = 8 * 15$$

$$I_{at.50N,UFERSA} = 120 A$$

A corrente $I_{at.50N,UFERSA}$ não deve ser superior que $I_{cc,\phi t}$ no ponto 20, verificando, tem-se que:

$$559 > 120 A$$

Nota-se que a condição é satisfeita.

5.7 Coordenação relé da UFERSA – relé da COSERN

O critério de coordenação relé-relé abaixo foi desenvolvido considerando um atraso de 0,2 segundos entre os tempos de atuação do relé protetor (UFERSA) e o relé protegido (COSERN).

- Determinação dos tempos de atuação das unidades 51F e 51N do relé da COSERN.

Da Equação 4, tem-se que:

$$t_{at,51FN} = TMS \left(\frac{0,14}{M^{0,02} - 1} \right)$$

Onde, das Equações 5 e 11, pode-se obter múltiplos de fase e neutro como mostrado abaixo:

$$M_{Fase} = \frac{1103,11}{120 * 3} = 3,1$$

$$M_{Neutro} = \frac{175,1}{120 * 0,5} = 2,93$$

Utilizando os múltiplos anteriores e $TMS_{fase} = 0,1$ e $TMS_{Neutro} = 0,2$, os tempos de atuação das unidades temporizadas de fase ($t_{at,51F,cosern}$) e neutro ($t_{at,51N,cosern}$) do relé da COSERN são dados por:

$$t_{at,51Fcosern} = 0,61s$$

$$t_{at,51Ncosern} = 1,29s$$

- Determinação dos tempos de atuação das unidades 51F e 51N do relé da UFERSA:

Da Equação 65, tem-se que:

$$t_{at,51FN} = TMS \left(\frac{0,14}{M^{0,02} - 1} \right)$$

Das Equações 5 e 11, tem-se os seguintes múltiplos de fase e neutro para o relé da UFERSA:

$$M_{Fase} = \frac{1103,11}{15 * 4,8} = 15,32$$

$$M_{Neutro} = \frac{175,1}{15 * 0,8} = 14,7$$

Utilizando os múltiplos anteriores e $TMS_{fase} = 0,14$ e $TMS_{Neutro} = 0,16$, tem-se os tempos de atuação das unidades temporizadas de fase ($t_{at,51F,UFERSA}$) e neutro ($t_{at,51N,UFERSA}$) do relé da UFERSA são os seguintes:

$$t_{at,51F,UFERSA} = 0,35s$$

$$t_{at,51N,UFERSA} = 0,41s$$

Assim, para as unidades temporizadas de fase tem-se que:

$$t_{at,51F,COSERN} \geq t_{at,51F,UFERSA} + 0,2s$$

$$t_{at,51F,COSERN} \geq t_{at,51F,UFERSA} + 0,2$$

$$0,61 \geq 0,35 + 0,2$$

$$0,85 \geq 0,55$$

Por outro lado, tem-se a seguinte inequação para as unidades temporizadas de neutro:

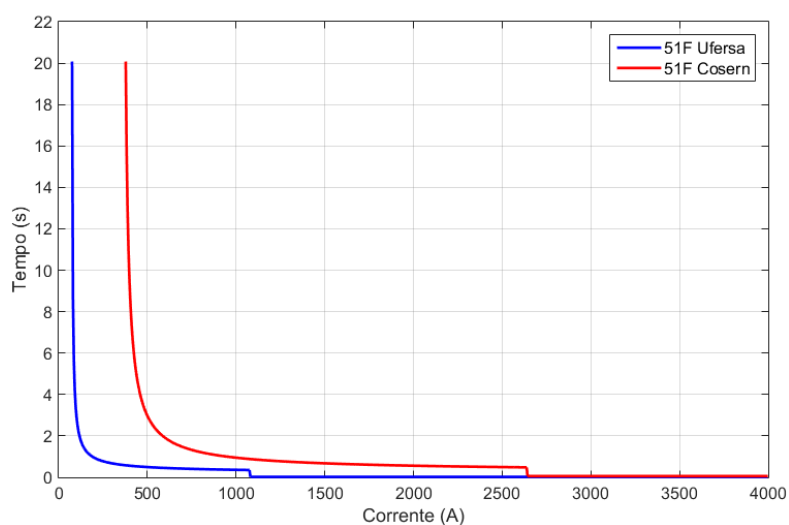
$$t_{at,51N,COSERN} \geq t_{at,51N,UFRSA} + 0,2$$

$$1,29 \geq 0,41 + 0,2$$

$$1,29 \geq 0,61$$

A Figura 30 mostra o coordenograma obtidos para as funções 50 e 51 de fase dos relés da UFRSA e COSERN.

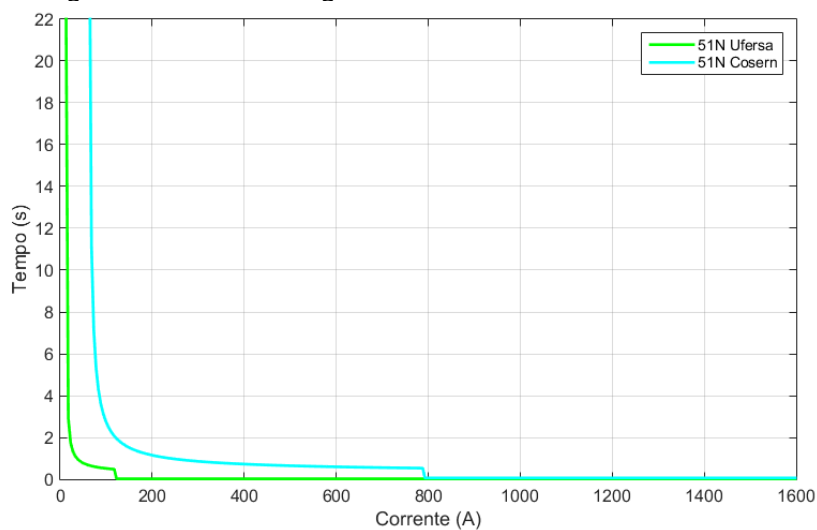
Figura 30 - Coordenograma das unidades 50 e 51 de fase.



Fonte: Autoria própria, 2019.

A Figura 31 mostra o coordenograma obtidos para as funções 50 e 51 de neutro dos relés da UFRSA e COSERN.

Figura 31 - Coordenograma das unidades 50 e 51 de neutro.



Fonte: Autoria própria, 2019.

Portanto, verifica-se que ambos os relés operam coordenados. A Tabela 10 mostra todos os ajustes obtidos para o relé da UFERSA - Caraúbas.

Tabela 10 - Ajustes obtidos para o relé da UFERSA:- Caraúbas.

Fase		Neutro	
$I_{ajuste51F}$	4,8 A	$I_{ajuste51N}$	0,8 A
$I_{ajuste50F}$	72 A	$I_{ajuste50N}$	8 A
<i>tatuação do relé51F</i>	0,35 s	<i>tatuação do relé51N</i>	0,41 s
Curva	0,14 NI IEC	Curva	0,16 NI IEC

Fonte: Autoria própria, 2019.

A seguir, são abordadas as considerações finais do presente trabalho.

6 CONCLUSÃO

Em um ambiente universitário, onde são constantemente realizadas atividades que dependem diretamente da energia elétrica para o desenvolvimento das atividades de ensino, pesquisa e extensão, é fundamental que o sistema de proteção siga as recomendações impostas pelas normas técnicas, para que, na ocorrência de uma falta elétrica, o sistema de proteção atue de forma eficiente, evitando, assim, danos materiais, a vida e perda de produtividade ou interferência no desenvolvimento das atividades normais desenvolvida na universidade.

Nesse sentido, o presente trabalho realizou o projeto do sistema de proteção da rede interna de média tensão da UFERSA - Caraúbas, dando ênfase ao dimensionamento de elos-fusíveis, chaves-fusíveis e relés. Os critérios de dimensionamento de tais dispositivos aplicados de modo a garantir coordenação e seletividades entre o funcionamento dos mesmos. Também é importante destacar que, realizou-se a análise dos níveis de curto-circuito em diversos pontos da rede interna de média tensão do referido campus de modo a ser possível especificar as capacidades de interrupção dos dispositivos de proteção e aplicar os critérios de coordenação e seletividade citados anteriormente.

Deve-se destacar que, na situação atual, a rede interna de média tensão da UFERSA-Caraúbas não possui elos-fusíveis ao longo do alimentador principal, apenas no circuito primário dos transformadores e na saída da subestação. Essa característica faz com que a proteção atual não seja seletiva, sendo observado, na prática, o desligamento completo do campus devido à atuação da proteção principal da subestação ou abertura da chave-fusível na saída da mesma.

Para evitar os transtornos destacados, recomenda-se a instalação de mais duas chaves fusíveis no alimentador principal da rede de media tensão, como mostrado nesse trabalho. Essa alteração pode implicar na garantir da continuidade do fornecimento de energia elétrica do campo e apresenta custo implementação muito baixo. Devido sua instalação relativamente simples, os serviços associados à instalação dos referidos elos-fusíveis podem ocorrer em um final de semana, não havendo, portanto, interferência no desenvolvimento das atividades cotidianas do campo.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6856. **Transformador de corrente – Especificações e ensaios**. Rio de Janeiro: ABNT 2015

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 14039: **Instalações elétricas de média tensão de 1,0 kV a 36,2 kV**. Rio de Janeiro: ABNT, 2005.

ALMEIDA, M. A. D. **Apostila de Proteção de Sistemas Elétricos**. 2000.

BANDEIRA, Gabriela de Oliveira. **Dimensionamento Da Proteção Contra Sobrecorrentes Da Subestação Da Ufersa – Campus Caraúbas**. 2017. 49 f. Monografia - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Caraúbas, 2017.

CAMINHA, A. C. **Introdução à Proteção dos Sistemas Elétricos**. São Paulo: Edgard Blücher, 1977.

Disj. a Pequeno Volume de Óleo PL15C. Disponível em: < <http://www.beghim.com.br/disjuntor-a-pequeno-volume-de-oleo> > Acesso em 10 ago. 2019.

FREITAS, Walmir; SATO, Fujio. **Análise de curto-circuito e princípios de proteção em sistemas de energia elétrica**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2015.

KINDERMANN, G. **Curto Circuito**. 2. ed. Porto Alegre: Edição do autor, 1997, 1v.

KINDERMANN, G. **Proteção de sistemas elétricos de potência**. 2. ed. Florianópolis: Edição do autor, 2005, 1 v.

MAMEDE FILHO, J.; MAMEDE, D. R. **Proteção de sistemas elétricos de potência**. Rio de Janeiro: LTC, 2011.

MAMEDE FILHO, J. **Manual de Equipamentos Elétricos** 3 ed.. Rio de Janeiro: LTC, 2005.

MAMEDE FILHO, J. **Instalações elétricas industriais**. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2010.

MASCARENHAS, Layse Ribeiro. **Uma Metodologia Para O Dimensionamento Da Proteção Contra Sobrecorrente De Subestações Superiores A 300 KVa.** 2016. 106 f. Monografia - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Vale do São Francisco, Juazeiro, 2016.

NOR.DISTRIBU-ENGE-0023: **Fornecimento de Energia Elétrica em Média Tensão de Distribuição à Edificação Individual.** Rn: COMPANHIA ENERGÉTICA DO RIO GRANDE DO NORTE, 2017.

Relé de proteção de Sobrecorrente com Fonte Capacitiva. Disponível em: <<https://www.pextron.com/index.php/pt-br/solucoes-01/coluna-3/cabines-primarias-03/urpe7104-02>> Acesso em: 10 ago. 2019.

STEVENSON JUNIOR, W. D. **Elementos de análise de sistemas de potência.** 2. ed. São Paulo: Mc-Graw Hill, 1986.

ZANETTA JR, L. C. **Fundamentos de sistemas elétricos de potência.** 1. ed. São Paulo: Livraria da física, 2006.