



UNIVERSIDADE FEDERAL DO TOCANTINS
CAMPUS DE PALMAS
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

RODRIGO ALVES FERREIRA

**PROTEÇÃO DE SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO UTILIZANDO O
*SOFTWARE ANAFAS.***

Palmas/TO
2021

RODRIGO ALVES FERREIRA

**PROTEÇÃO DE SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO UTILIZANDO O *SOFTWARE*
ANAFAS.**

Trabalho de conclusão de curso apresentada à
Universidade Federal do Tocantins – campus
Palmas para obtenção do título de Bacharel em
Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Sergio Manuel Rivera
Sanhueza.

Coorientador: Prof. Dr. Adélcio Maximiano
Sobrinho

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Tocantins

A474p Alves Ferreira, Rodrigo.
PROTEÇÃO DE SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO UTILIZANDO O
SOFTWARE ANAFAS.. / Rodrigo Alves Ferreira. – Palmas, TO, 2021.
57 f.

Monografia Graduação - Universidade Federal do Tocantins – Câmpus
Universitário de Palmas - Curso de Engenharia Elétrica, 2021.

Orientador: Sergio Manuel Rivera Sanhueza

Coorientador: Adelicio Maximiano Sobrinho

1. Transformadores. 2. Software. 3. Curto-circuito. 4. Proteção. I. Título

CDD 621.3

TODOS OS DIREITOS RESERVADOS – A reprodução total ou parcial, de qualquer
forma ou por qualquer meio deste documento é autorizado desde que citada a fonte.
A violação dos direitos do autor (Lei nº 9.610/98) é crime estabelecido pelo artigo 184
do Código Penal.

Elaborado pelo sistema de geração automática de ficha catalográfica da UFT com os
dados fornecidos pelo(a) autor(a).

FOLHA DE APROVAÇÃO

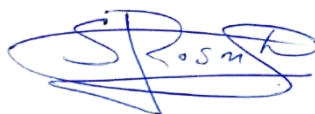
RODRIGO ALVES FERREIRA

PROTEÇÃO DE SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO UTILIZANDO O SOFTWARE ANAFAS

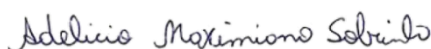
Projeto de Graduação foi avaliado e apresentado à UFT – Universidade Federal do Tocantins – Câmpus Universitário de Palmas, Curso de Engenharia Elétrica, para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica e aprovado em sua forma final pelo Orientador e pela Banca Examinadora.

Data de aprovação: 20/05/2021

Banca Examinadora



Prof. Dr. Sergio Manuel Rivera Sanhueza, UFT



Prof. Dr. Adélcio Maximiano Sobrinho, UFT



Maxwell Diógenes B. de Melo
Prof. de Engenharia Elétrica
Má. 1292005 CUR/UEFT

Prof. Dr. Maxwell Diógenes Bandeira de Melo, UFT

AGRADECIMENTOS

Agradecer a Deus, por ter me concedido sabedoria e paciência necessárias ao longo do percurso da graduação.

Gratidão a minha mãe Maria Madalena Ferreira da Silva que sempre me incentivou e investiu nos meus estudos, sem ela esse passo não teria acontecido. Agradeço a minha irmã Carolyne Alves Ferreira por todo suporte emocional e também pelos conselhos de futuros caminhos profissionais relacionados e externos a área de formação a seguir.

Agradecer a todo corpo docente do curso, pela transmissão de conhecimentos, especialmente ao orientador Sérgio Manuel Rivera Sanhueza e o coorientador Adélio Maximiano Sobrinho que sempre mostraram-se solícitos ao sanar dúvidas surgidas no processo de realização desse trabalho de conclusão de curso.

Agradecer também ao Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (CEPEL), por ter concedido a licença do *software* ANAFAS para UFT, pois sem esse programa alguns passos seriam difíceis de serem executados nessa tese.

RESUMO

O presente trabalho tem a finalidade de realizar a proteção de um sistema de distribuição, o resguardo desse sistema será realizado com base nos níveis de curto-circuito, que serão obtidos através do ANAFAS, esse que é um *software* bastante utilizado por empresas e órgãos setoriais específicos relacionados ao meio energético do país.

Partido desse pressuposto o presente trabalho tem a finalidade de envolver conceitos sobre uma das áreas essenciais na Engenharia Elétrica que é a proteção de um sistema elétrico de potência, para isso utilizou-se as principais literaturas abrangentes sobre o assunto, além do programa ANAFAS, esse que foi essencial para obtenção dos níveis de curto-circuito, pois através dos resultados obtidos na simulação dimensionou-se os transformadores de corrente da subtransmissão e da subestação particular. Com relação a localidade de 69 kV empregou-se o exemplo 3.11 do livro proteção de sistemas elétricos, de João Mamede Filho. As salvaguardas dos transformadores da distribuição e da subestação particular tiveram como base respectivamente as normas de distribuições unificadas 006 e 002. Dessa forma os métodos empregados ao longo da tese proporcionaram os cálculos, esses que serviram para o dimensionamento das proteções das regiões formadoras do SEP.

Palavras-chaves: transformadores; *Software*; curto-circuito; proteção.

ABSTRACT

The present work has to protect a distribution system, the protection of this system will be carried out based on the levels of short circuit, which will be used through ANAFAS, which is a software widely used by specific companies and sector related bodies to the country's energy environment. Based on this assumption, the present work has a concept of concepts about one of the essential areas in Electrical Engineering, which is the protection of an electrical power system. For this purpose, the main comprehensive literature on the subject was used, in addition to the ANAFAS program, which it was essential to obtain the short-circuit levels, because through the results obtained in the simulation, the current transformers of the subtransmission and of the particular substation were dimensioned. Regarding the 69 kV location, example 5.3 from the book Protection of Electrical Systems, by João Mamede Filho, was used. The safeguards for the distribution transformers and the private substation are based, respectively, on the unified distribution standards 006 and 002. Thus, the methods used throughout the thesis provided the calculations, which were used to dimension the protection of the forming regions. of the SEP

Key-words: transformers; Software; Short Circuit; Protection.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Tipologia padrão de um sistema de distribuição	15
Figura 2- Representação simples de um sistema sem coordenação seletiva e um com coordenação seletiva	17
Figura 3- Relés eletromecânicos	18
Figura 4- Relé estático	18
Figura 5- Diagrama de blocos de um relé digital	19
Figura 6- Relé digital	20
Figura 7- Esquema de ligação de um relé de neutro	22
Figura 8- Diagrama funcional da proteção de sobretensão	23
Figura 9- Diagrama unifilar da junção de proteção 51 e 27	25
Figura 10- simbologia de disjuntor em diagramas unifilares	26
Figura 11 - Chave fusível do tipo expulsão	27
Figura 12 - Invólucro para proteção da bucha de alta tensão	29
Figura 13 - Sistema de distribuição de energia	31
Figura 14 - Faixa de opções	33
Figura 15 - Interface do EditCepel	33
Figura 16 - Acessar constantes básicas	33
Figura 17 - Potência base do sistema	34
Figura 18 - dados do segmento de linha 2-3	35
Figura 19 - Informações do transformador 1	35
Figura 20 - Dados da barra 1	36
Figura 21 - Análise para simulação	36
Figura 22 - Estudo macro em barras	37
Figura 23 - Correntes trifásicas	37
Figura 24 - Esquemático da atuação do relé do segmento 1-2	40
Figura 25 - Coordenograma do ajuste de fase de acordo com a NDU-002	45
Figura 26: Coordenograma do ajuste de neutro de acordo com a NDU-002	47
Figura 27 - Diagrama unifilar da subestação	48
Figura 28: Fluxograma	50

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Curvas Presentes na norma IEC-60255-3	22
Tabela 2 - Casos analisados no SEP	31
Tabela 3 - Parâmetros das linhas	32
Tabela 4 - Parâmetros dos transformadores	32
Tabela 5 - Resistências e retâncias percentuais	34
Tabela 6 - Zonas de atuação	38
Tabela 7 - Zonas de atuação e alcance	38
Tabela 8 - Alcance da zona de atuação do relé do trecho 1-2	40
Tabela 9 - Parâmetros expostos no coordenograma de fase	45
Tabela 10 - Valores das grandezas utilizadas no coordenograma de fase	46
Tabela 11 - Parâmetros expostos no coordenograma de neutro	47
Tabela 12 - Valores das grandezas usadas no coordenograma de neutro	47
Tabela 13 - Equipamentos de proteções existentes por região	50

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
ONS	Operador Nacional do Sistema Elétrico
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
MME	Ministério de Minas e Energia
NBR	Norma Brasileira
SEP	Sistema Elétrico de Potência
SE	subestação
ANSI	American National Standards
ANAFAS	Análise de Falhas Simultâneas
TC	Trasformador de corrente
TP	Transformador de potencial
IEC	Internation Electrotechnical Commission
NDU	Norma de distribuição unificada
PRODIST	Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional

LISTA DE SÍMBOLOS

k	Constante específica das curvas características dos relés
α	Dial de tempo
M	Múltiplo da corrente

SUMÁRIO

1 Introdução	12
1.1 Justificativas	13
1.2 Objetivos	13
1.2.1 Objetivo Geral	13
1.2.2 Objetivos específicos	13
1.3 Metodologia	14
1.4 Levantamento bibliográfico	14
2 Sistema de distribuição de energia	15
2.1 Filosofia de proteção de sistemas elétricos	16
2.2 Principais equipamentos de proteção em sistema de distribuição	17
2.2.1 Relés de proteção	17
2.2.2 Relés eletromecânicos de indução	17
2.2.3 Relé eletrônicos	18
2.2.4 Relés digitais microprocessados	19
2.3 Relé classificados em relação as funções de proteção	20
2.3.1 Relés de sobrecorrente	20
2.3.2 Relé de sobretensão	23
2.3.3 Relé de distância	24
2.3.4 Relé de Subtensão	24
2.3.5 Relé de religamento	25
2.4 Disjuntores	25
2.4.1 Coordenação entre disjuntores	26
2.4.2 Coordenação entre disjuntores e elos fusíveis	26
2.5 Chaves fusíveis	27
2.6 Religador	28
2.7 Proteção de transformadores de distribuição	29
2.8 Curto – circuito	30
2.9 O software ANAFAS	30
3 Estudo de caso	31
3.1 Simulação do sistema via software anafas	32
3.2 Proteção da linha de subtransmissão	38
3.3 Proteção dos transformadores de média tensão por elos fusíveis	41
3.4 Proteção de uma subestação particular	42
4 Conclusões	51
4.1 Trabalhos futuros	51
REFERÊNCIAS	52

1 Introdução

As implementações e ocorrências de melhorias nos sistemas elétricos de potência atualmente estão atreladas a modelagem e simulações em programas computacionais, essas que possibilitam a análise prévia de parâmetros relevantes para a rede elétrica como: fluxo de potência, níveis de curto circuito e demais características que envolvem a proteção do sistema. Esses que são alguns dos fatores essenciais para a construção e consolidação de um Sistema Elétrico de Potência (SEP).

Tem-se que o sistema elétrico de potência tem como principal função fornecer energia elétrica aos usuários grandes ou pequenos com a qualidade adequada, tendo como base os parâmetros de qualidade descritos no módulo 8 do PRODIST. Dessa forma, o sistema tem a função de produtor transformando uma determinada natureza energética, como por exemplo hidráulica em elétrica, e de distribuidor fornecendo a quantidade de energia demanda aos consumidores (KAGAN, 2010), sendo que essa última característica será de maior abrangência neste trabalho.

Dentre os diversos equipamentos que compõe um sistema de distribuição, um dos mais importantes, são os transformadores de potência, os quais por meio de indução eletromagnética transfere energia de um circuito, chamado primário, para outros denominados secundários e terciários (MAMEDE, 2018).

Esses dispositivos são instalados na rede levando em consideração as potências instaladas, porém para uma melhor funcionalidade é necessário o dimensionamento adequado das suas proteções e uma das características avaliadas são os níveis de curto circuito nas linhas de distribuição, pois está é a falha mais comum de ocorrer em um SEP, a ocorrência desta produz correntes elevadas que acabam circulando pelos equipamentos energizados, ocasionando graves distúrbios de tensão pelo sistema elétrico, gerando problemas ao sistema e às instalações das unidades consumidoras (MAMEDE, 2017).

Partindo desse pressuposto tem-se que a proposta do trabalho é fazer uma análise dos parâmetros das linhas de distribuição e realizar as proteções dos transformadores do circuito presente no artigo (SANHUEZA et al, 2007).

1.1 Justificativas

Os sistemas de proteção têm como principal funcionalidade desligar parcela de um SEP que se encontra com falhas, ou operando fora das suas condições normais. Dessa forma, analisar a proteção de um sistema de distribuição é de extrema relevância, tendo em vista que ela possibilita uma atuação rápida para minimizar riscos a integridade física das pessoas e danos aos equipamentos que estão conectados à rede elétrica, e um dos fatores que geram grande distúrbios em um SEP é o curto circuito (MANASSERO, 2013).

Em decorrência disso a utilização de ferramentas computacionais desenvolvidas a partir de técnicas de otimização adotadas em projetos de planejamento de um sistema de distribuição, promovem ganhos consideráveis nos custos de expansão e operação de um sistema (OLIVEIRA, 2010).

Dentro desse cenário, o trabalho vigente tem como propósito analisar computacionalmente a rede de distribuição do artigo mencionado, a fim de promover uma confiabilidade ao seu sistema elétrico.

Ademais, o trabalho visa promover um conhecimento e um incentivo para a utilização do software ANAFAS no meio acadêmico, esse programa que é uma ferramenta poderosa para os cálculos de curto-circuito em um SEP, largamente utilizado por empresas como Eletrobras e por órgãos setoriais como ONS, ANEEL, MME, EPE etc.

1.2 Objetivos

Neste tópico serão abordados os principais objetivos gerais e específicos referentes as temáticas da tese.

1.2.1 Objetivo geral

Fazer um estudo do curto circuito da rede de distribuição composta por 14 barras disposta no artigo (SANHUEZA et al, 2007).

1.2.2 Objetivos específicos

- Simular a rede de distribuição em questão no software ANAFAS;
- Através da simulação observar nela os níveis de curto - circuito trifásicos nas barras;
- Observando os dados obtidos dimensionar os transformadores de corrente da subtransmissão e da subestação;
- Ajustar as proteções das linhas de subtransmissão, redes de distribuição e subestação particular de consumidores.

1.3 Metodologia

A primeira parte do trabalho consistirá em fazer uma revisão bibliográfica. O tema inicial a ser abordado será sobre as principais características de uma rede de distribuição posteriormente será relatado alguns dos princípios que norteiam a filosofia da proteção tais como: confiabilidade, sensibilidade, zona de proteção, seletividade e coordenação dos dispositivos. Posteriormente será feito um exposto sobre os principais equipamentos de proteção presentes no sistema de subtransmissão, distribuição e subestação particular, em seguida decorrerá descrições sobre curto circuito, esse que terá seus resultados verificados através de simulações efetuadas no programa ANAFAS, onde obteve-se os níveis de curto – circuito trifásicos nas 14 barras do sistema elétrico em estudo. Em relação a proteção de transformadores da distribuição utilizou-se a NDU-006 e os ajustes para a subestação particular temporizado (51) e instantâneo (50), tiveram como referência a NDU-002, do grupo Energisa.

1.2 Levantamento bibliográfico

Este trabalho de conclusão de curso contém 4 capítulos:

No Capítulo 1, decorre-se uma abordagem sobre os principais conceitos em relação ao sistema elétrico de potência, e sobre a importância do SEP ter uma proteção adequada através dos dispositivos que o compõe, é relevante mencionar que o escopo de algumas etapas desse capítulo constitui-se de determinadas referências de teses e livros á cerca do tema em análise no trabalho, além disso essa etapa inicial visa mostrar a relevância da realização do projeto através de suas partes constituintes que são : a justificativa, os objetivos gerais e específicos e a metodologia.

O Capítulo 2 abordará os principais temas relacionados a proteção de sistemas elétricos de potência, em que será realizado um estudo dos equipamentos de proteção constituintes de um sistema elétrico de distribuição e também será feita uma descrição dos principais aspectos relacionados ao curto-circuito. Esse capítulo também é baseado em monografias e livros, vale ressaltar duas bibliografias comumente utilizadas para relatar sobre a proteção de sistemas que são: Proteção de Sistemas elétricos de potência (KINDERMANN, 2012) e (MAMEDE, 2017). Em relação ao curto circuito uma bibliografia com uma didática simples e que tem uma riqueza de informações sobre a temática destaca-se Análise de Curto-Circuito e Principios de Proteção em Sistemas de Energia Elétrica (SATO, 2015).

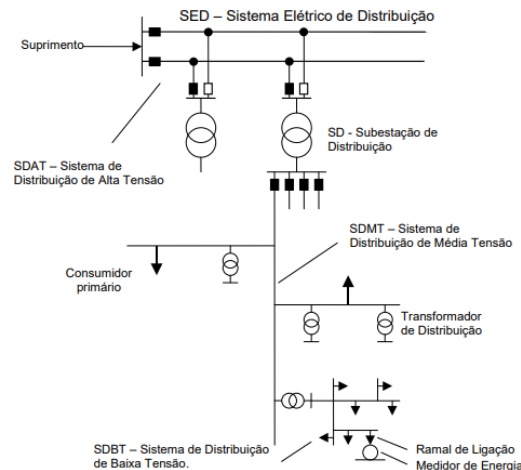
O Capítulo 3 abrange a parte mais prática dessa monografia, em que realiza-se o estudo de caso das três regiões formadoras do sistema elétrico, nesse contém: o resultado da simulação realizada no ANAFAS, os cálculos de dimensionamentos das proteções, os coordenogramas da subestação particular, e também utiliza-se das literaturas pertinentes.

O quarto e último, refere-se a conclusão geral sobre o trabalho, em que discorreu-se sobre os resultados, a importância da proteção em um SEP e da relevante contribuição do ANAFAS.

2 Sistema de distribuição de energia

A distribuição é a parte do setor elétrico que está incluída nos centros de utilização (cidades, bairros, indústrias). Essa parte do SEP começa a partir da subestação abaixadora, onde a tensão de transmissão tem seu valor baixado para níveis de tensão padronizados nas redes de distribuição primária, por exemplo, 13,8kV e 34,5 kV (CREDER,2018). A Figura 1 mostra as partes que formam um sistema de distribuição:

Figura 1- Tipologia padrão de um sistema de distribuição.



Fonte: FELBER. (2010).

Uma das partes relevantes de um sistema de distribuição é a rede primária de tensão, essa quando é aérea apresenta duas tipologias usuais que são a primário radial com socorro e primário seletivo. A primeira caracteriza-se pelos seguintes aspectos: ser instalada em áreas que demandam grandes quantidades de carga ou em lugares que necessitam de um maior grau de confiabilidade, como por exemplo, hospitais, por possuírem chaves de seccionamento, que operam na condição normalmente fechada que tem a finalidade de isolar blocos de carga, cujo objetivo é promover uma manutenção corretiva ou preventiva, nessa tipologia radial com socorro também é comum instalar em um mesmo circuito ou em distintos, chaves normalmente abertas, que podem ser fechadas em manobras de transferência de carga (KAGAN, 2010). A Figura 2 apresenta dois circuitos que se derivam da mesma subestação.

O sistema primário seletivo é basicamente constituído de dois circuitos primários radiais partindo de uma mesma subestação (SE), eles alimentam transformadores através de chaves de transferência. Essas chaves quando o sistema está funcionando normalmente conectam o consumidor a um dos circuitos, em caso de contingência, essas chaves são transferidas para outra conexão fechada (BISCARO,2019).

A outra parte importante de um sistema de distribuição é a rede de tensão secundária, essa segundo ANEEL (2015-b), é um conjunto de equipamentos e linhas de distribuição com tensões nominais inferiores a 1 kV. A rede de baixa tensão inicia-se após a passagem da tensão pelo transformador de potência, onde esse dispositivo baixa a tensão que se encontra na faixa de 13,8 kV

para tensões 380/220V ou 220/127V e essas são tensões destinadas aos consumidores residenciais, pequenos comércios e indústrias (CAJUEIRO, 2019). Além disso a configuração da rede secundária aérea pode ser em malha ou radial.

2.1 Filosofia de proteção de sistemas elétricos

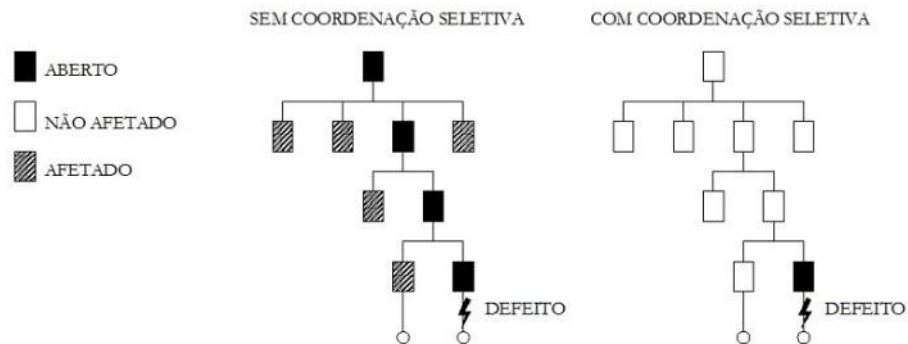
A filosofia da proteção é referente as ações que compreendem ao sistema de proteção, dessa forma envolve as ações de selecionar, coordenar, ajustar, e aplicar aos diversos equipamentos e dispositivos de proteção de um sistema elétrico, de forma a guardar entre si uma determinada relação, tal que qualquer anomalia presente no sistema possa ser isolada e removida, sem que as outras partes que o constituem sejam afetadas (CASTRO, 2016).

Tendo em vista isso algumas definições relevantes sobre a filosofia de proteção de um SEP são apresentadas a seguir:

- **Confiabilidade:** segundo a NBR-5462, é a capacidade de um item desempenhar uma função sob condições especificadas durante um dado intervalo de tempo. Ela é uma característica relevante para um sistema de proteção de uma rede de distribuição, pois garante que ele funcione com segurança e exatidão, tendo em vista que qualquer anomalia ocorrendo na rede o sistema de proteção atuará de forma confiável (GAIO, 2016).
- **Sensibilidade:** É referente a capacidade de um dispositivo de proteção perceber problemas em sua zona de atuação. A resposta de um sistema de proteção às anomalias que possam existir tem que ocorrer com a menor margem possível de tolerância entre a operação e não operação dos seus dispositivos (FILHO, 2010).
- **Velocidade:** É de suma relevância uma atuação rápida dos sistemas de proteção, minimizando assim os efeitos de uma falha em todo sistema, pois tempos elevados de atuação acarreta instabilidade e danos aos equipamentos do sistema protegido. Em certas situações despreza-se velocidade em favor a seletividade através de processos de coordenação (SILVA, 2012).
- **Seletividade:** Essa expressão está relacionada a organização dos dispositivos de proteção de maneira que somente o elemento em falta seja isolado do resto do SEP, ou seja, os demais equipamentos que não estiver com problemas permaneceram conectados ao sistema (COTOSCK, 2007).
- **Coordenação:** Esse conceito atrela-se à proteção coordenada, essa que é projetada para atuar de forma parcial na ocorrência de uma falta momentânea, ou na abertura permanentemente de um circuito na existência de um agravante contínuo. Uma proteção coordenada é importante pois ela possibilita o restabelecimento automático de um sistema para irregularidades transitórias e a seletividade para defeitos permanentes (LEDESMA, 2012). É relevante mencionar que toda proteção coordenada apresenta seletividade, mas nem toda proteção seletiva é coordenada.

A Figura 2 mostra exemplo de uma proteção coordenada que tem seletividade e outra que é seletiva mas não possui coordenação:

Figura 2- Representação simples de um sistema sem coordenação seletiva e um com coordenação seletiva.



Fonte: <http://aprendendoeletrica.com/o-que-e-coordenacao-e-seletividade/>.

2.2 Principais equipamentos de proteção em sistema de distribuição

2.2.1 Relés de proteção

O relé de proteção é um equipamento cuja finalidade é detectar anormalidades no sistema elétrico, esse dispositivo pode atuar tanto em um elemento ou em um sistema constituinte de um SEP, retirando os equipamentos ou um determinado trecho que esteja sob falhas, ou acionando circuitos de alarme quando precisa. Esse equipamento também irá conceder permissão para um elemento ou um sistema ser energizado, se estiver satisfeitas certas condições de normalidades (ARAÚJO et al., 2005).

2.2.2 Relés eletromecânicos de indução

Essa é uma categorização dos relés que se refere a aspectos construtivos, os relés eletromecânicos, foram as primeiras formas existentes desses dispositivos, eles funcionavam através de forças de atuação produzidas através de interações eletromagnéticas entre as correntes e o fluxo magnético sobre um condutor móvel (HOROWITZ, 2014).

Os relés eletromecânicos atualmente são de tecnologia obsoleta por isso não são mais fabricados. Entretanto eles ainda são bastante utilizados em esquemas de proteção de consumidores industriais e residenciais de grande porte (JUNIOR, 2006). Essa tipologia de relé apresenta vida útil bem extensa e são trocados somente se houver alguma modificação significativa nos sistemas de proteção de uma SE, como por exemplo, reforma, ampliação ou requer um melhor desempenho (SILVA, 2014).

Os ajustes desses relés são realizados através de diais encontrados sobre a sua tampa de vidro, determinadas unidades operacionais necessitam de fontes de correntes elevadas externa para realizar o ajuste. A sinalização é do tipo mecânico, com o surgimento de uma bandeirola vermelha indicando que a unidade operou (ARAUJO, 2017). A Figura 3 mostra exemplos de relés

eletromecânicos.

Figura 3 - Relés eletromecânicos



Fonte: ARAUJO. (2017).

2.2.3 Relés eletrônicos

Os relés eletrônicos ou estáticos surgiram da necessidade de modernizar os sistemas de proteção de um SEP, em virtude disso na década de 1960 começaram as experimentações que visaram a construção de relés de proteção baseados em componentes eletrônicos, sendo que na década posterior sua utilização tornou-se intensa, esses relés caracteriza-se pela inexistência de componentes mecânicos móveis (NETTO, 2008).

As funções anteriores realizadas nos relés eletromecânicos por peças mecânicas e indução magnética, são produzidas nos relés estáticos através de circuitos impressos. Não trouxeram significativas inovações aos sistemas de proteção (MAMEDE FILHO; MAMEDE, 2013). A Figura 4 mostra um relé dessa categoria.

Figura 4 – Relé estático.



Fonte: CARVALHO. (2018)

2.2.4 Relés digitais ou microprocessados

Os relés digitais são controlados por determinado *software* presente nos microprocessadores, tendo uma administração das informações digitais de entrada das tensões e corrente (ARAÚJO, 2017).

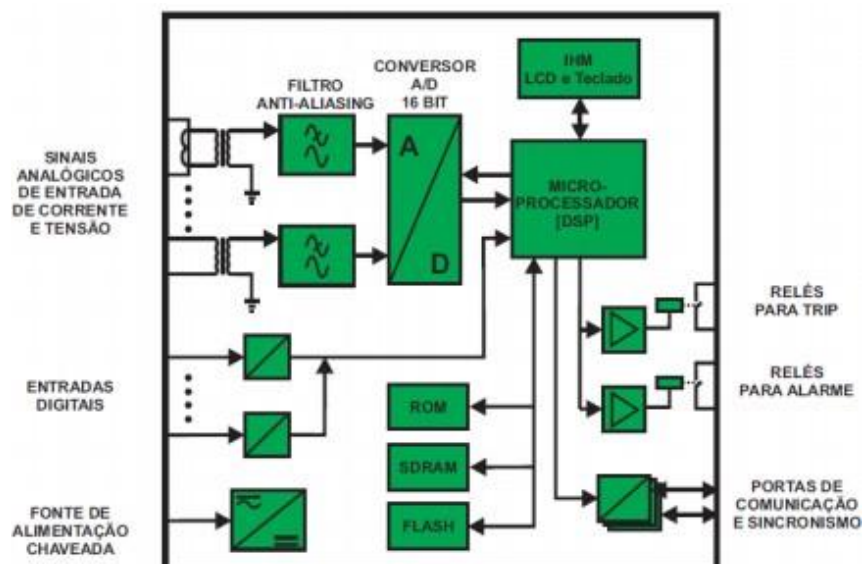
Esses relés na atualidade dominam o mercado, pois eles inovaram os esquemas de proteção, pois não possuem somente funções de proteções seguras, mas também realizam funções de comunicação, medidas elétricas, controle, sinalização remota, acesso remoto etc.(MAMEDE FILHO, 2013).

Algumas das vantagens que um relé digital podem ter:

- **Confiabilidade:** Identificar defeitos internos através de um monitoramento constante de um relé digital programado. O relé digital pode produzir um alarme para um sistema central quando ocorrer uma falha elétrica (PHADKE, 2009) .
- **Flexibilidade de funcionamento:** Pode ser utilizado para variadas funções e também pode executar diversas outras tarefas em uma SE. Por exemplo: medição, monitoramento, controle, verificar trechos com falhas, servir de retaguarda para relés que estão sob faltas (PHADKE, 2009).
- **Custo:** Os primeiros relés custavam cerca de 20 a 10 vezes mais que os relés convencionais estáticos. Com o passar do tempo eles foram reduzindo de preço e sua velocidade de processamento aumentaram significativamente (SILVA et al, 2014).
- **Integração digital:** Esses relés tornaram-se a base nas SEs, pois medições, comunicação de dados são realizados através da tecnologia digital. Os relés digitais nas subestações modernas devem estar integrados naturalmente aos seus sistemas (SILVA et al, 2014).

A Figura 5 mostra o diagrama de blocos de um relé de proteção digital.

Figura 5 - Diagrama de blocos de um relé digital.



Fonte: SANTOS. (2018).

A fonte de alimentação fornece a tensão necessária para o funcionamento de seus componentes internos, as entradas digitais relata os estados dos disjuntores e demais dispositivos, os sinais analógicos, advindos do transformador de corrente (TC) e transformador de potencial (TP), são tratados antes de sua atuação a unidade de processamento. No começo são filtrados por filtros passa-baixa, posteriormente á filtragem decorre uma conversão analógico-digital (SANTOS, 2018).

Essa tipologia de relé pode ter mais de uma memória a RAM (Random Access Memory) que armazena dados temporários, a ROM (Read Only Memory) que guarda informações do fabricante, acessadas para operações de leitura, ainda tem a Memória FLASH em que os dados são deletados eletricamente, e nela estão armazenados os dados permanentes (SANTOS, 2018).

O microprocessador que administra as funções lógicas de entrada e saída, analisa os dados recebidos e executa os programas dedicados, que são os denominados algoritmos de proteção, guardados em memórias FLASH (NETTO, 2008).

Os circuitos de saída executam as funções de trip do relé, enviando ao equipamento atrelado o sinal de disparo, e as portas de comunicação permite a comunicação com outros equipamentos (SANTOS, 2018). A Figura 6 refere-se a um relé digital.

Figura 6 - Relé digital



Fonte: RENDA. (2008).

2.3 Relés classificados em relação as funções de proteção

Nesse tópico serão abordadas as principais funções de proteção de uma rede de distribuição, tendo como base o (MAMEDE, 2013), que relata que as principais funções de proteção de um sistema de distribuição são: sobrecorrente instantânea de fase (50) e de neutro (50N), temporizada de fase (51) e de neutro (51N), sobretensão (59), subtensão (27) e relé de religamento (79) para controlar um religador.

2.3.1 Relés de sobrecorrente

Esses relés tem como finalidade atuar quando a corrente atinge um valor maior ou igual a corrente de ajuste previamente estabelecida (corrente de pick-up), um sinal de trip é enviado para um determinado disjuntor que isolará a falta. Este relé pode ser enquadrado em duas categorias

sendo elas instantâneo e temporizado (MOMESSO, 2017).

Os relés de sobrecorrente instantâneos são representados pelo número 50 de acordo com o código American National Standarts Institute (ANSI). A principal função é identificar as faltas mais nocivas e sana-las instantaneamente, para reduzir os danos causados a um SEP, apesar de ser instantâneo ocorre um pequeno atraso na sua atuação devido ao processamento do relé (MOMESSO, 2017).

É relevante mencionar que os relés instantâneos são geralmente colocados próximos ao elemento temporizado de tal forma que a sua atuação ocorra para correntes superiores a maior corrente de falta no ponto correspondente a 85% da linha, contando a partir do ponto de instalação do relé, os outros 15% é referente a folga que permite a seletividade do relé. Ademais, a sua utilização é recomendada em sistemas radiais, cuja coordenação dos relés é feita ajustando gradativamente a corrente de pick-up, de tal forma que o relé mais próximo da fonte tenha maior corrente e o relé encontrado no extremo oposto tenha uma menor corrente. É importante destacar que a coordenação desses relés não são apropriadas se a impedância entre eles não forem significativas, tendo em vista a dificuldade de distinguir a zona de proteção pertinente a falta (MOMESSO, 2017).

A outra forma de relé de sobrecorrente é a temporizada que é representada pela numeração 51 de acordo com o código ANSI. Esses relés são subdivididos em duas formas sendo elas de tempo definido e de tempo inverso. O mais relevante é o de tempo inverso, pois ele contribui para a proteção de diversos pontos de uma zona de proteção.

Partido desse pressuposto tem-se que o relé de tempo inverso possibilita a escolha de uma curva de atuação e a coordenação dos relés é feita a partir de tempos distintos para uma mesma corrente de curto circuito (SANTOS, 2018). Esses são projetados em tempos de operação inversamente proporcionais ao módulo da corrente, dessa forma quanto maior a sobrecarga de um sistema mais rapidamente a proteção atuará (MARTINS, 2012). As formas das curvas podem seguir os padrões europeus (IEC), norte americano (ANSI) ou dos próprios fabricantes. Baseando-se na norma IEC 60255-3 (IEC, 1989), a classificação das curvas podem ser: normalmente inversa, muito inversa e extremamente inversa essas curvas tem como eixo a equação (1) (MOMESSO, 2017):

$$t = \frac{k \cdot dt}{(M^{\alpha} - 1)} \quad (1)$$

Onde:

t = Tempo de atuação do relé

dt = Dial

M = Múltiplo da corrente

A seguir é mostrada a Tabela 1 com os valores referentes as constantes K e α :

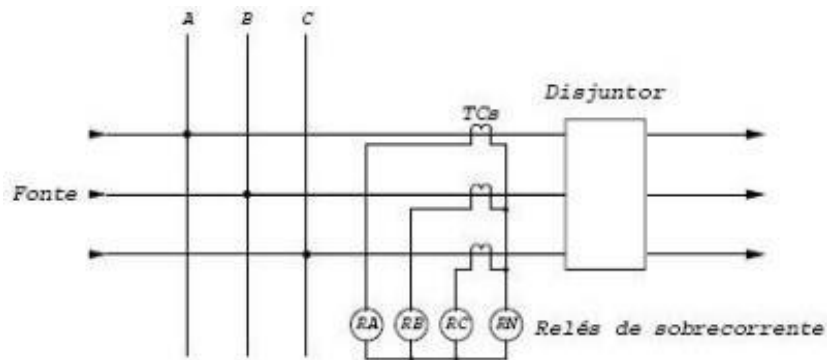
Tabela 1: mostra os valores K e α da norma IEC 60255-3.

NOME DA CURVA	K	α
Normalmente Inversa	0,14	0,02
Muito Inversa	13,50	1,00
Extremamente Inversa	80,00	2,00

Fonte: MOMESSO.(2017).

O relé de sobrecorrente é também denominado de relé de sequências zero, um dos esquemas comumente utilizado é representado na Figura 7:

Figura 7- Esquema de ligação de um relé de neutro.



Fonte: ALMEIDA. (2008).

RN = Relé de neutro

RA , RB e RC = Relé de fase

Nessa configuração tem-se que as correntes trifásicas presente no secundários do TC reproduzem correntes similares no primário.

De acordo com equação (2) Aplicam-se as leis de Kirchhoff no nó de ligação entre os quatro relés, obtendo:

$$I_n = I_A + I_B + I_C \quad (2)$$

Onde:

 I_n = Corrente de neutro I_A = Corrente da fase A I_B = Corrente da fase B I_C = Corrente da fase C

Através da componentes simétricas, apresenta-se a equação (3):

$$I_N = 3I_0 \quad (3)$$

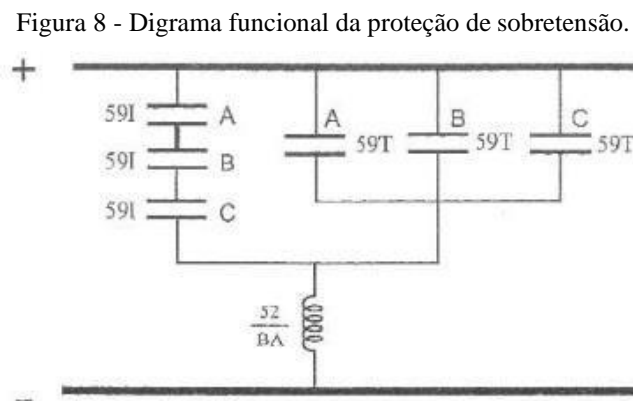
Verifica-se que a corrente que esco para o circuito primário tem a sua réplica passando

pelo relé de neutro, dessa forma tem-se que o relé de neutro é sensível a componente de sequência zero das correntes de fase, na ocorrência de um curto – circuito.

2.3.2 Relé de sobretensão

Esses relés são responsáveis por atuar quando os valores de tensão excede a tensão aceitável para operação de um sistema, essa atuação pode ser através de sinais de alarme, de chaveamento para bancos de capacitores, e dependendo da configuração do sistema ou do dispositivo a ser protegido gerenciar comando de abertura para disjuntores. Esses relés podem ter categorização instantânea e temporizada (SILVA, 2012). A função de proteção contra sobretensão é representada pelo número 59 no código de tabelas presentes na norma ANSI.

A Figura 8 mostra um diagrama funcional da proteção de sobretensão:



Fonte: KINDERMANN. (2012).

Com base no diagrama da figura 8 ocorre que se houver uma sobretensão nas três fases as 3 unidades instantâneas irão atuar. Pela imagem verifica-se que os contatos das unidades instantâneas estão em série dessa forma somente ocorrerá a operação do disjuntor se os três contatos dos relés fecharem. Na ocorrência de sobretensão em uma fase, a unidade instantânea responsável por essa fase irá fechar, porém não ocorrerá a atuação do disjuntor (KINDERMANN, 2012).

Na figura 8 observa-se que as unidades de sobretensão temporizadas estão em paralelo, dessa forma qualquer unidade que atuar ocasionará o disparo do disjuntor. Ademais pode ocorrer uma sobretensão em uma ou duas fases que se manterá por um determinado tempo ocasionando a operação da unidade de sobretensão temporizada (KINDERMANN, 2012).

2.3.3 Relé de distância

É uma proteção que se fundamenta no cálculo da impedância por meio da tensão e corrente. O relé de distância através de ajustes possibilita a coordenação da proteção ele é comumente utilizado em linhas médias e extensas, é importante mencionar que esse tipo de relé não é afetado

pela variação da carga ou tensão durante uma falha, o seu tempo de atuação permanece constante, independente da natureza elétrica dos dispositivos, o relé de distância se divide em três formas dependendo da característica do sistema elétrico, sendo elas relatadas a seguir (CARVALHO, 2017):

- Relé de impedância: essa divisão do relé é indicada para ser utilizada em linhas de transmissão de tamanho médio, e o seu tempo de disparo não depende da corrente de curto-circuito.
- Relé de admitância: esse é basicamente um relé direcional que tem restrição de tensão, é utilizado em linhas de transmissão longas para o seu nível de tensão.
- Relé de reatância: tem a característica de não ser afetado pelas resistências de arco voltaico é indicado para linhas curtas, tendo em vista que as resistências de arco voltaico afeta consideravelmente a impedância total dessas linhas.

O relé de distância é representado pela função 21 de acordo com a tabela ANSI. A equação (4) é utilizada para o ajuste do relé de impedância.

$$Z_s = z_p * \frac{R_{tc}}{R_{tp}} \quad (4)$$

Onde:

Z_s = Impedância do secundário

Z_p = Impedância da linha

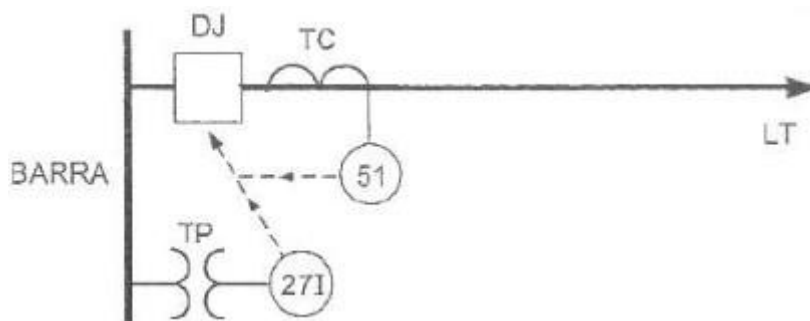
R_{tc} = Relação de transformação de um TC

R_{tp} = Relação de transformação de um TP

2.3.4 Relé de Subtensão

Esse relé irá atuar quando a tensão é reduzida para um valor abaixo do pré- ajustado, grande parte das vezes em um sistema de proteção, o relé de subtensão é combinado com outros relés, por exemplo, juntando ele com um relé de sobrecorrente com monitoramento permissivo por subtensão, essa união implica que o disjuntor irá disparar se houver operação dupla, entre essas duas tipologias de relés (KINDERMANN, 2012). A representação desse relé é o número 27 na tabela ANSI. A Figura 9 refere-se a um digrama unifilar com relés que desempenham as funções 51 e 27:

Figura 9 – Diagrama unifilar da junção de proteção 51 e 271.



Fonte: KINDERMANN. (2012).

2.3.5 Relé de religamento

Esses relés são utilizados quando a proteção de sobrecorrente atua em decorrência da existência de uma falta. Ele tem a função de enviar um sinal automático ao disjuntor responsável por desconectar o circuito, após um tempo previamente estabelecido, o relé de religamento pode ordenar o fechamento do circuito até três vezes, sendo que o tempo de cada religação pode ser configurado independente. Depois da quarta abertura do religador, o relé de religamento entra em bloqueio e deixa o circuito defectivo desenergizado (MAMEDE, 2013).

Esses relés são utilizados exclusivamente em subestações de potência, tendo em vista que as faltas nelas são normalmente transitórias como galhos de árvores, eles não são apropriados para instalações comerciais e industriais, pois geralmente as falhas nessas localidades são permanentes (MEMEDE, 2013). Dessa forma o relé de religamento é propício para faltas transitórias devido ao seu caráter de religar o circuito se o defeito for momentâneo. A numeração dessa proteção na tabela ANSI é a função 79.

2.4 Disjuntores

São dispositivos de manobras e proteção que tem como uma de suas funções principais suportar correntes elétricas sob a sua tensão máxima de rede nas condições normais de funcionamento, como conectar ou desconectar uma linha da rede elétrica, esses equipamentos eletromecânicos são relevantes para qualquer sistema elétrico (SAMPAIO, 2012).

Os disjuntores devem ser instalados associados a relés específicos, sendo que eles são os responsáveis pelo acionamento dos disjuntores no surgimento de correntes elétricas acima do estabelecido. (SAMPAIO, 2012).

As principais funções de um disjuntor na proteção de um SEP são interromper de maneira rápida a corrente na existência de um curto circuito I_{cc} , terem a capacidade de suportar além das correntes nominais as correntes magnetizantes dos transformadores, reatores, as correntes capacitivas de banco de capacitores e de linhas a vazio e dentre outras funções que os disjuntores desempenham relacionadas a proteção de um SEP (SAMPAIO, 2012). A Figura 10 representa a simbologia de um disjuntor em diagramas unifilares, a sua numeração em relação a nomenclatura

ANSI é 52:

Figura 10 - Simbologia de disjuntores em diagramas unifilares.



Fonte: MIGLIATO. (2017).

2.4.1 Coordenação entre disjuntores

A temática abordada nesse subtópico e no próximo tem como base os expostos apresentados no livro (MAMEDE, 2013).

Para haver coordenação da proteção tem que ser levado em conta os seguintes aspectos:

- A função de sobrecorrente de fase do relé a montante deve operar como proteção de retaguarda.
- A função de sobrecorrente de fase do relé deve operar em situações de falhas trifásicas, bifásicas e fase terra e coordenar com as proteções a montante e a jusante. Essa situação é específica de disjuntor instalado na cabine de proteção de uma unidade consumidora.
- A função instantânea dos relés inseridos em série devem ser coordenadas por diferenças de corrente ou por escalonamento de tempo em que a unidade instantânea encarrega-se de ser uma unidade de tempo definido.

O termo Montante se refere a um ponto do circuito próximo da fonte, em que a referência é o ponto de instalação do equipamento de proteção. Já o termo jusante é referente a locais do circuito perto da carga em que a referência é o ponto de instalação do equipamento de proteção, definições disposta na NDU-017 da Energisa 2012.

2.4.2 Coordenação entre disjuntores e elos fusíveis

Para haver coordenação entre o disjuntor do alimentador de distribuição e elos fusíveis devem ser atendido os seguintes requisitos:

- A função referente a sobrecorrente de fase tem que ser configurada para operar para menor corrente do trecho salvaguardado por um disjuntor.
- A curva tempo x corrente de sobrecorrente de fase e de neutro não pode interceptar a curva tempo x corrente do elo fusível no trecho salvaguardado pelo disjuntor.
- A curva tempo x corrente de sobrecorrente de fase e de neutro tem que estar acima da curva tempo x corrente ao logo do caminho protegido pelo disjuntor.
- O afastamento entre as curvas supracitadas anteriores devem ser de no mínimo de 0,20 segundos ao longo do percurso salvaguardado pelo disjuntor.

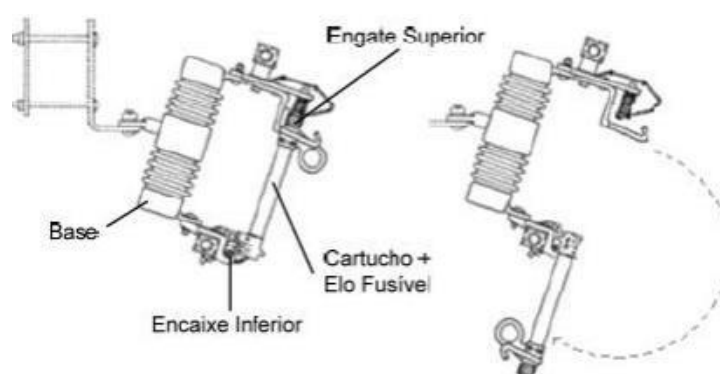
Nestes casos, considera-se que os elos fusíveis atuem previamente a proteção de fase em curto - circuitos trifásicos e bifásicos e antes da proteção de neutro em casos de curto circuitos fase – terra.

- A curva tempo x corrente de sobrecorrente de fase e de neutro do alimentador deve estar distanciada da curva tempo x corrente da unidade de sobrecorrente de fase e de neutro do disjuntor geral da subestação, entre 0,30s a 0,40s.
- A curva tempo x corrente de sobrecorrente de fase deve estar configurada abaixo da corrente de curto-circuito aceitável pelos cabos e dispositivos do alimentador de distribuição.
- A função de sobrecorrente instantânea de fase não deve operar para as correntes magnetizantes dos transformadores.
- O transformador de corrente de proteção da subestação deve ser projetado para suportar 20 vezes a sua corrente nominal, sendo dimensionado para aguentar os níveis de curto-circuito na barra da subestação.

2.5 Chaves fusíveis

É um equipamento eletromecânico que tem a função de proteger ramais e demais dispositivos contra sobrecorrentes em uma rede de distribuição comumente eles protegem transformadores e capacitores (SILVA, 2012). As formas de chaves fusíveis mais utilizadas em uma rede de distribuição são: abertas, expulsão, indicadoras e não repetidoras (VIANA, 2015). A seguir apresenta-se a Figura 11 referente a chave fusível do tipo expulsão que é uma das mais usuais:

Figura 11 - Chave fusível do tipo expulsão.



Fonte: VIANA. (2015).

Pela Figura 11 nota-se que tem um cartucho e nele está contido o elo fusível, esse elemento tem a função de identificar uma sobrecorrente, após ela passar pelo elo fusível ele se fundirá, e a partir desse momento origina-se um arco elétrico que queima o cartucho internamente, posteriormente é liberado gases desionizantes que elimina o arco, cessando a passagem da corrente (VIANA, 2015).

Os elos fusíveis em relação as características (Tempo x Corrente) são categorizados a

seguir (SILVA, 2002):

- Tipo H: São elos de alto surto tem ação lenta e são usuais como proteção primária de transformadores menores. Dessa forma não queimam em surtos transitórias em relação a energização de trafos suportam de 80 a 100 A em 0,1s. para cada valor nominal de corrente a fusão desse elo começa em 300s.
- Tipo K e T: Os elos K e T tem características de serem rápidos e lentos respectivamente. As duas formas admitem como sobrecarga 1,5 vezes seus valores nominais, sem causar elevada temperatura na chave fusível. Essa capacidade tem extrema relevância em aplicações onde a coordenação limita a escolha da bitola. A fusão de ambos se dá com 2,5 vezes os seus valores nominais em relação a um tempo de 300 s.

Os elos fusíveis podem ser protegido ou protetor, o primeiro caracteriza-se por ser instalado do lado da fonte o outro por ser colocado do lado da carga. Existe duas características relevantes para um elo fusível ser considerado de boa qualidade que são: não ter suas características (Tempo x corrente) inalteradas quando eles estiverem em serviço e trabalhar em temperatura baixa, o que possibilita evitar a utilização de determinados metais como, por exemplo, o cobre pois ele é um elemento que oxida reduzindo o diâmetro que conseqüentemente afeta as suas características (SILVA, 2002).

É importante ressaltar que a atuação lenta do elo do tipo H ocorre para que ele não opere durante a energização do transformador devido a corrente inrush. Os elos do tipo K são comumente utilizados em proteção de ramais ou nos caminhos finais dos alimentadores. Os elos do tipo T são instalados de modo geral nas proteções dos alimentadores e ramais (CARVALHO, 2018). Os elos fusíveis são utilizados bastante na proteção de um sistema de distribuição devido ao seu baixo custo e por ter desempenhos satisfatórios.

2.6 Religador

Os religadores automáticos são equipamentos que tem a função de fazer com que o fornecimento de energia seja realizado de maneira confiável e segura. Os religadores são dispositivos essenciais para interromper faltas transitórias, evitando queimas de elos fusíveis, se coordenado adequadamente com os elos fusíveis eles são capazes de seccionar apenas o local sob defeito e mantendo assim as demais partes energizadas. Esses dispositivos não se limitam a identificar e interromper falhas, eles possuem em suas configurações mecanismo de temporização dupla, que após um defeito ser identificado ele dispara de forma rápida dentro de 0,03 a 0,04 segundos, o que acaba minimizando danos ao sistema (SILVA, 2002).

Os religadores são equipamentos que tem diversas vantagens sendo que três das principais são: maior flexibilidade tendo em vista que eles possibilitam a coordenação e seletividade com os demais dispositivos de proteção, melhor proteção para distribuição de energia devido a rapidez e facilidade para operação (SANTOS, 2012).

Os religadores trifásicos são utilizados tanto em subestações, quanto em redes de distribuição (SANTOS, 2012). Os religadores de distribuição são mais utilizados em RDR do que em uma RDU (MAMEDE, 2013).

Outro dispositivo presente em redes de distribuição são os seccionadores, esses que são equipamentos que estão atrelados a religadores, cuja principal funcionalidade dele em um sistema de distribuição é seccionar um trecho sob falta, eles são elementos que operam a uma corrente máxima no valor da sua corrente nominal.

2.7 Proteção de transformadores de distribuição

Os transformadores são equipamentos que não apresentam elevados índices de falhas, porém quando elas acontecem as concessionárias e os consumidores são prejudicados em decorrência de desligamento acidental ou forçado, o que acaba ocasionando paralisações, riscos e manobras corretivas duradouras (KINDERMANN, 2012).

Em sistemas de distribuição para a proteção de transformadores na maioria das vezes são utilizados as chaves fusíveis e os para-raios que os salvagam de sobrecorrentes e de sobretensões respectivamente, além disso nos transformadores é comum encontrar invólucro polimérico com a finalidade de evitar que aves entrem em contato direto com as buchas de alta tensão, evitando assim a existência de curto circuito entre elas (FERREIRA, 2013). A Figura 12 apresenta as buchas de alta tensão protegidas.

Figura 12 - Invólucro para proteção da bucha de alta tensão.



Fonte: FERREIRA. (2013).

2.8 Curto-circuito

O curto-circuito origina-se da ruptura do isolamento entre as fases ou entre fase e terra, ele é uma das perturbações mais comum de ocorrência em um SEP e a mais severa, é um dos agravantes que tende a alterar grandezas elétricas como tensão e corrente. Em decorrência disso ele coloca em risco os equipamentos e as instalações, devido a isso é necessário tomar medidas preventivas ou corretivas que visem limitar ou sanar as consequências dessa perturbação. O curto circuito mais comum de ocorrer é o fase-terra (SATO, 2015).

Consonante a isso é de extrema relevância a existência de um sistema de proteção eficaz que impeça a propagação prolongada do curto circuito em um SEP, para isso é relevante conhecer previamente o comportamento das tensões e correntes durante um curto-circuito (LUCENA, 2017).

Na análise de curto circuito leva-se em conta as correntes de falta, essas que variam de acordo com o tipo de curto circuito existente, esses que podem ser simétrico, ou assimétrico que decorre da falta entre duas fases ou entre fase terra (SATO, 2015).

2.9 O *Software* ANAFAS

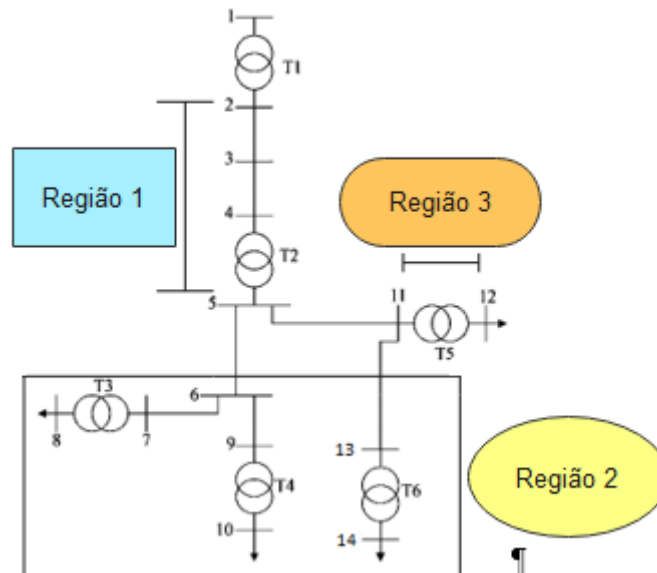
O ANAFAS (Programa de Análises de Faltas Simultâneas) é um programa computacional destinado a analisar faltas existentes em um SEP, ele visa melhorar o tempo de simulação e a análise de resultados em relação as simulações que envolve condições de defeito em uma rede elétrica (DECOURT, 2007). A versão acadêmica do ANAFAS, que será utilizada tem uma limitação de 120 barras para a verificação dos estudos de caso (GOMES, 2018).

O ANAFAS é uma ferramenta que se torna relevante em estudos de curto-circuito, que é um dos focos principais desse trabalho que é verificar através desse software os níveis de curto circuito e realizar as devidas proteções do sistema de distribuição proposto.

3 Estudo de Caso

O sistema em estudo tem como fonte base para verificação de sua estruturação da proteção, as normas de distribuição unificada da Energisa, (NDU-002) para a subestação particular e (NDU-006) para transformadores da média tensão, em relação a subtransmissão utilizou-se um livro que será citado posteriormente. A Figura 13 é referente ao SEP em estudo:

Figura 13 - Sistema de distribuição de energia.



Fonte: SANHUEZA et al. (2007).

Posteriormente, mostra-se aparente a Tabela 2, mostrando os casos em análise no SEP da figura 13:

Tabela 2: Casos analisados no SEP.

Caso 1	Proteção da subtransmissão	Engloba a região 1
Caso 2	Proteção dos trafos da distribuição	Engloba a região 2
Caso 3	Proteção da SE particular	Engloba a região 3

Fonte: Próprio Autor.

Constata-se que o SEP em análise é composto por 14 barras e apresenta 9 segmentos de linhas e 6 transformadores, destacando-se que o T5 representa uma subestação particular. As Tabelas 3 e 4 referem-se as características do sistema elétrico:

Tabela 3: Parâmetros das linhas.

SEGMENTOS DE LINHAS	R(Ω/kM)	X(Ω/kM)	L(kM)
1-2	0.2	0.5	20
2-3	0.2	0.5	20
3-4	0.2	0.5	20
5-6	0.19	0.38	4
6-7	0.19	0.38	2.5
6-9	0.19	0.38	2
5-11	0.19	0.38	7
11-13	0.19	0.38	0.5

Fonte: SANHUEZA et al. (2007).

Tabela 4: Parâmetros dos transformadores.

TRANSFORMADORES	V (KV)	S	X(%)
T₁	13.8/69	10MVA	6
T₂	69/13.8	10MVA	6
T₃, T₄ e T₆	13.8/0.2	300KVA	4.5
T₅	13.8/0.2	500KVA	4.5

Fonte: SANHUEZA et al. (2007).

Os tópicos subsequentes demonstrará os passos e os cálculos efetuados, realizados na proteção de cada parte formadora do sistema de distribuição em análise, tendo como referência as correntes de curto-circuito obtidas pela simulação do ANAFAS no resguardo da subestação particular e da subtransmissão.

3.1 Simulação do sistema via *Software* ANAFAS

A primeira etapa realizada no simulador, refere-se a montagem do sistema de distribuição de energia, para isso utilizou-se os elementos presentes na faixa de opções do ANAFAS, principalmente o ícone em formato de lápis, onde localiza-se os elementos formadores do SEP em questão como: gerador, barras, transformadores e as linhas de transmissão. A Figura 14 representa a faixa de opções.

Figura 14 - Faixa de opções.



Fonte: ANAFAS.

Em seguida decorre-se a definição da potência base do sistema, essa que é inserida em um programa auxiliar do ANAFAS chamado EditCepel, através dele realiza-se as configurações das constantes básicas do sistema em simulação. A Figura 15 representa a interface desse *software*:

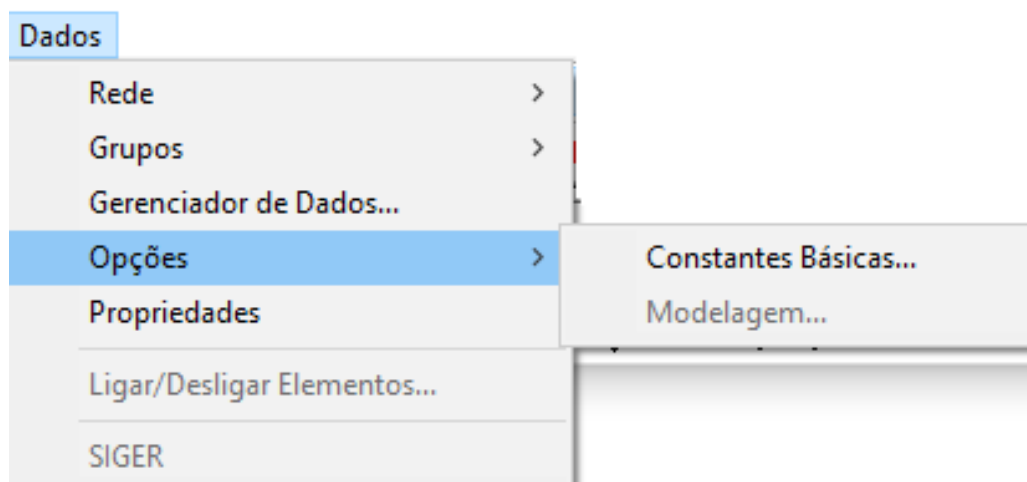
Figura 15: Interface do EditCepel.

TIPO																										
01	L P																									
02	BASE																									
03	10.000000																									
04	DBAR																									
05	(NB	CEM	BN	VBAS DISJUN				DDMMMAAADMMMAAAA IA SA P																		
06	(---	---	---	-----				-----																		
07	1	Barra 1				13.8																				
08	2	Barra 2				69																				
09	3	Barra 3				69																				
10	4	Barra 4				69																				
11	5	Barra 5				13.8																				
12	11	Barra 11				13.8					1															
13	12	Barra 12				0.38					2															
14	13	Barra 13				13.8					1															
15	14	Barra 14				13.8					1															
16	99999																									
17	DCIR																									
18	(BF	CE	BT	NCT	R1	X1	R0	X0	CN	TB	TCIA	DEF	RM	CD	RNDE	XNDE	CP	RNPA	XNPA	SA	NunNop	DJ_BF	CicDJ	BT	Cic	
19	(---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
20	1		2	17		600		600				30		Y											D	
21	2		3	110.8402		2100.8402		210LT1					20													
22	3		4	110.8402		2100.8402		210LT2					20													
23	4		5	17		600		600				30		D				Y								
24	5		11	11	28	0.552		28	0.552	L73			7													
25	11		12	17		450		450		T5			30					Y								
26	11		13	11	2	4		2	4	L74			2		0.5											
27	99999																									
28	DARS																									
29	(NN	C																								
30	(---	=																								
31	1	Área oriunda de algum bloco de dados																								
32	2	Área oriunda de algum bloco de dados																								
33	99999																									
34	99999																									

Fonte: EditCepel.

Através da figura 15, verifica-se as constantes básicas existentes no SEP em estudo como: a potência base adotada no sistema que é de 10MVA, observa-se também os níveis de tensão existente nas barras e mostra também as resistências e reatâncias percentuais das linhas e dos transformadores, após a realização da mudança da potência base no EditCepel, torna-se relevante averiguar a ocorrência da modificação dela no simulador, As Figuras 16 e 17 referem-se a essa análise:

Figura 16 - Acessar constantes básicas.



Fonte: ANAFAS.

Figura 17 - Potência base do sistema.

The image shows a software dialog box titled "Constantes Básicas". It contains two input fields. The first is labeled "Grau de Vizinhança (NBACK)" and has the number "2" entered. The second is labeled "Base de Potência do Sistema (MVA)" and has the number "10" entered. At the bottom of the dialog, there are two buttons: "OK" and "Cancelar".

Fonte: ANAFAS.

Importante frisar que utilizou-se os dados da Tabela 3 para obter as resistências e reatâncias percentuais das linhas, o passo inicial consiste em pegar a impedância de cada uma delas e multiplicar pelo comprimento dos segmentos de linhas correspondentes, em seguida promover a divisão delas com as impedâncias bases referentes as linhas de 69KV e 13.8KV, obtidas através da Equação (5):

$$Z_b = \frac{V_b^2}{S_b} \quad (5)$$

Onde:

Z_b = Impedância base

V_b = Tensão base

S_b = Potência base

A expressão anterior fornece as impedâncias em sistema por unidade, após esses passos multiplicou-se os cálculos encontrados por cem, encontrando-se os dados presentes na Tabela 5:

Tabela 5: Resistências e reatâncias percentuais.

SEGMENTOS DE LINHAS	R(%)	X(%)
2-3	0.84	2.1
3-4	0.84	2.1
5-6	3.99	7.98
6-7	2.49	4.98
6-9	1.95	3.99
5-11	6.98	13.97
11-13	0.49	0.99

Fonte: Próprio Autor.

Os dados da tabela anterior é colocado na caixa de dados de linha de transmissão presente no simulador do *software*. A Figura 18 é um exemplo do local de inserção de um dos dados presentes na tabela 5:

Figura 18 - dados do segmento de linha 2-3.

Fonte: ANAFAS.

Ademais, existem locais similares e específicos para colocar as informações relativas aos transformadores e as barras. Exemplos desses lugares são mostrados Nas Figuras 19 e 20:

Figura 19 - Informações do transformador 1.

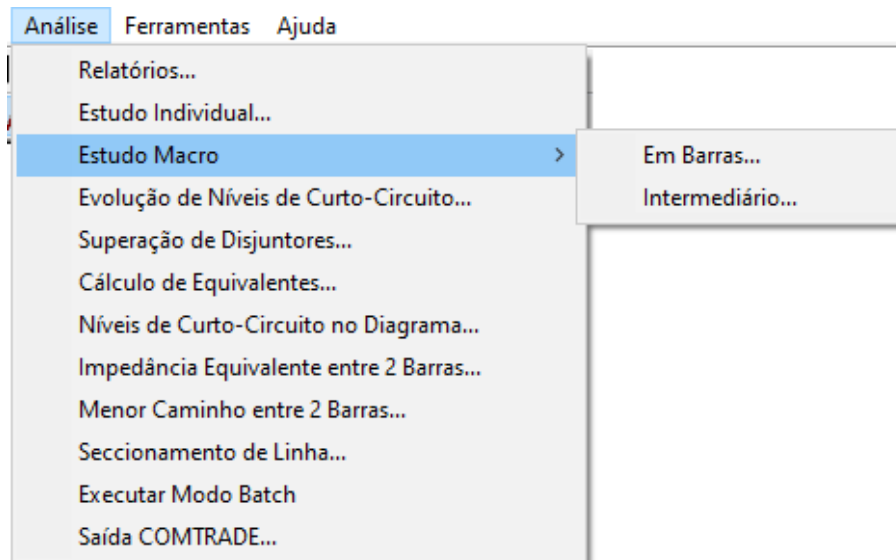
Fonte: ANAFAS.

Figura 20 - Dados da barra 1.

Fonte: ANAFAS.

Após os procedimentos anteriores efetuados, teve início a simulação, essa que é realizada através da aba análise, e nesse campo contém o estudo macro que apresenta duas formas de averiguar os níveis de curto circuito de modo total que são: o intermediário e o em barras, esse último adotado no SEP presente. Nas Figuras 21 e 22 são expostos os passos que perpassaram a simulação e a Figura 23 é o resultado obtido:

Figura 21 - Análise para simulação.



Fonte: ANAFAS.

Figura 22 - Estudo macro em barras.

Estudo Macro em Barras

Tipo de Defeito

- Sólido Monofásico (At)
- Sólido Bifásico (BC)
- Sólido Bifásico-terra (BCt)
- Sólido Trifásico (ABC)
- Através de Impedâncias

Contingências em Circuitos Adjacentes

- Remoção (remove também seus acoplamentos)
- Desligamento (abertura e aterramento dos dois terminais)
- Curto-Circuito em Fim de Linha (abertura e curto-circuito no terminal remoto)
- Abertura do Terminal Remoto
- Abertura de Ambos Terminais

Número máximo de circuitos afetados simultaneamente: 1 2 3

Barras Afetadas

Relatório de Execução

Orientado a Ponto de Falta

Tensões: pu kV

Contribuições: pu A MVA

Ângulos: Normal (-180 a 180) Indutivo (-180 a 0) s/ ângulos

Barras Auxiliares: Sim Não

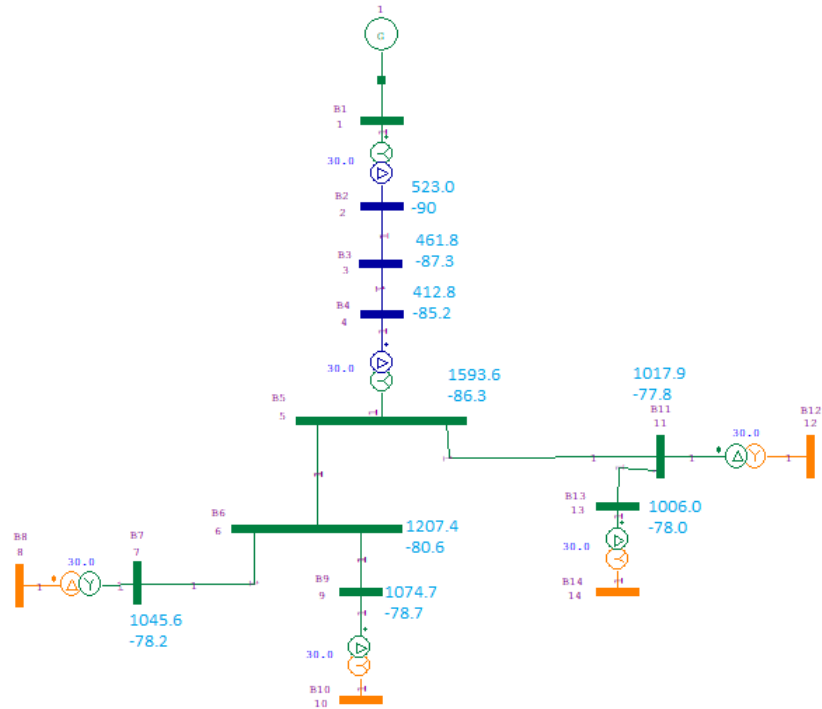
Orientado a Ponto de Monitoração

Modo: Normal Condicional

Ângulos: Com ângulos Sem ângulos

Fonte: ANAFAS.

Figura 23 - Correntes trifásicas.



Fonte: ANAFAS.

3.2 Proteção da linha de subtransmissão

Observando-se a Figura 23, a região azul corresponde a linha de subtransmissão de 69KV, ela possui 60 km de comprimento, para a realização da proteção desse local utilizou-se o relé de distância da tipologia impedância, os procedimentos efetuados para salvaguardar essa parte do SEP, teve como base o exemplo de aplicação 3.11, que está presente no livro “Proteção de Sistemas Elétricos de Potência”, de João Mamede filho.

A escolha da função 21 decorreu-se da facilidade em se obter uma melhor proteção dessa região, pois a impedância visualizada pelo relé de distância não é afetada quando acontecem variações de energia nessa localidade.

Outro fator relevante é que a linha de subtransmissão tem 3 zonas a serem protegidas, o que torna-se propício a implementação do relé de distância, pois normalmente ele tabalha em 3 áreas de atuação. A Tabela 6 relaciona as zonas de atuação com o tempo:

Tabela 6: Zonas de Atuação.

ZONA	TEMPO (S)
1°	Instântaneo
2°	0.15 a 0.5
3°	0.4 a 1,0

Fonte: MAMEDE. (2017).

Ademais, existe uma característica que merece ser destacada que é a relação entre as zonas de atuação de um relé e a porcentagem de alcance em trechos de linhas de transmissão, essa que é exposta na Tabela 7 com os respectivos segmentos da região em análise.

Tabela 7: Zonas de Atuação e Alcance.

ZONA	ALCANCE
1°	80% a 90% de 1-2
2°	1-2 +(20% a 75% de 2-3)
3°	1-2 + 2-3 + 3-4

Fonte: MAMEDE. (2017).

Consonante, aos pressupostos exibidos iniciou-se os cálculos para salvaguardar a linha de subtransmissão, tendo como referência o exemplo citado no início. Em seguida é relatado as etapas realizadas e apresentada as equações e os resultados obtidos através delas.

Inicialmente, buscou-se encontrar as impedâncias dos segmentos de linhas (1-2, 2-3, 3-4),

passo esse alcançado pela multiplicação das impedância presentes na tabela 3 pelos respectivos comprimentos de linha, ressalvando que no trecho 1-2 utilizou-se 10 km na efetivação do cálculo, haja vista que o relé de distância protege metade desse percurso. A seguir apresenta-se as Equações (6), (7) e (8) e os resultados desses segmentos:

$$Z_{L12} = Z_{12} * L_{12} = 2 + j5 = 5,385 (\Omega) \quad (6)$$

$$Z_{L23} = Z_{23} * L_{23} = 4 + j10 = 10,770 (\Omega) \quad (7)$$

$$Z_{L34} = Z_{34} * L_{34} = 4 + j10 = 10,0770 (\Omega) \quad (8)$$

Em seguida, buscou-se encontrar a impedância média ôhmica do trafo de 10MVA através da Expressão (9), que vale:

$$Z_m = \frac{10 * V_F^2 * Z_{ir}}{s} = \frac{10 * 69^2 * 6}{10000} = 28,566 (\Omega/\text{fase}) \quad (9)$$

Onde:

Z_m = Impedância ôhmica

V_F = Tensão de fase

Z_{ir} = Impedância do transformador

Posteriormente, foram executados cálculos pontuais como as relações de transformações dos transformadores de potencial e de corrente, sequencialmente é demonstrado a obtenção desses parâmetros através das Fórmulas (10) e (13) respectivamente:

$$RTP_1 = \frac{V_P}{V_S} = \frac{69 * 10^3}{\frac{115}{\sqrt{3}}} = 1039,230 \quad (10)$$

Onde:

RTP_1 = Relação de transformação do TP

V_P = Tensão do primário

V_S = Tensão do secundário

Antes da obtenção do RTC_1 , calculou-se a corrente nominal do T_1 , através dos critérios de curto-circuito e de cargas, aparentes respectivamente na Equações (11) e (12):

$$I_P = \frac{I_{cc3\phi}}{20} = \frac{523}{20} = 26,15 (A) \quad (11)$$

Onde:

I_P = Corrente do projeto

$I_{cc3\phi}$ = Corrente de curto – circuito trifásico

$$I_n = \frac{S}{\sqrt{3} * V_1} = \frac{10000}{\sqrt{3} * 69} = 83,674 (A) \quad (12)$$

Onde:

I_n = Corrente nominal

S = Potência do trafo

V_l = Tensão de linha

Com o a obtenção desses resultados das correntes, e observando a NBR-6856 da ABNT, conclui-se que a corrente primária de maior valor dentre as encontradas é a de 100 A, dessa forma levando-se em conta o cálculo do critério de carga por ter um resultado superior, obtém-se através da Equação (13):

$$RTC_1 = \frac{100}{5} = 20 \quad (13)$$

A etapa seguinte buscou-se a relação de transformação desses transformadores encontrando:

$$R_1 = \frac{RTP_1}{RTC_1} = 51,962 \quad (14)$$

A partir do módulo das impedâncias adquiridas com as Equações (6), (7) e (8), utilizou-se as expressões da tabela 7 para encontrar o alcance do relé situado na metade do trecho 1-2, adotando-se para as zonas 1° e 2° respectivamente as porcentagens de 80% e 50% dos segmentos correspondentes, obtendo-se os resultados presentes na Tabela 8:

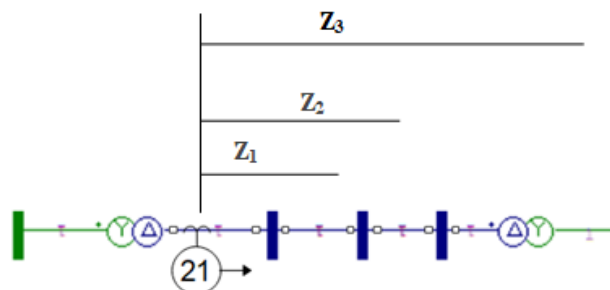
Tabela 8: Alcance da Zona de atuação do relé do trecho 1-2.

ZONA	ALCANCE (KM)
1°	8
2°	20
3°	50

Fonte: Próprio Autor.

Em seguida é mostrada A Figura 24 que representa a abrangência da atuação do relé 21:

Figura 24 - Esquemático da atuação do relé do segmento 1-2.



Fonte: Próprio Autor.

Após esse passo efetuou-se os ajustes das impedâncias secundárias, essa que é a grandeza que delimita a área de atuação do relé de distância através das zonas. Adiante tem-se as Fórmulas (15), (16) e (17) com as soluções:

$$Z_1 = \frac{Z_{L12} * 0,8}{R_1} = \frac{4,308}{51,962} = 0,083 (\Omega) \quad (15)$$

$$Z_2 = \frac{Z_{L12} + 0,5 * Z_{L23}}{R_1} = \frac{10,770}{51,962} = 0,207 (\Omega) \quad (16)$$

$$Z_3 = \frac{Z_{L12} + Z_{L23} + Z_{L34} + Z_m}{R_1} = 1,068 (\Omega) \quad (17)$$

Onde:

Z_1 = Impedância secundária limite da zona 1

Z_2 = Impedância secundária limite da zona 2

Z_3 = Impedância secundária limite da zona 3

Em relação a zona Z_3 , inseriu-se no cálculo a impedância por fase encontrada na equação 10, pois com isso o relé de distância cobrirá até o secundário do transformador T_2 .

A última etapa realizada na proteção da linha de subtransmissão, teve como referência a tabela 05, que tem a função de ajustar o tempo de disparo do relé, atribuindo-se para cada área:

$$T_1 = 0,05 (S) \quad (18)$$

$$T_2 = 0,05 + 0,40 = 0,45 (S) \quad (19)$$

$$T_3 = 0,45 + 0,45 = 90 (S) \quad (20)$$

3.3 Proteção da rede de distribuição por elos fusíveis

Essa parte do SEP corresponde a região em verde exposta na figura 23, essas linhas de distribuição apresentam tensão nominal de 13.8 KV, a proteção dessa rede de distribuição tem sua fundamentação na NDU-006 da Energisa, o foco a ser abordado é a salvaguarda dos transformadores, T_3 , T_4 e T_6 observados na figura 13.

Segundo, a norma supracitada nos transformadores de distribuição os elos são dimensionados a partir da capacidade do trafo de acordo com tabelas preestabelecidas na NDU-006, no caso em questão será utilizada a tabela 06 presente nela, tendo em vista que os transformadores são trifásicos.

Os trafos a serem protegidos apresentam capacidades iguais de 300 KVA, como observado na tabela 4, dessa forma os elos de cada um dos transformadores tem dimensionamentos iguais. A Equação (21) é referente ao elo:

$$I_n = \frac{s}{V_1 * \sqrt{3}} = \frac{300 * 10^3}{13,8 * 10^3 * \sqrt{3}} = 12,55 (A) \quad (21)$$

Onde:

I_n = corrente nominal do transformador

S = Potência do transformador

V_1 = Tensão de linha

Através da corrente obtida e verificando-se na tabela 6 da norma a capacidade do trafo e a tensão nominal características dos transformadores em análise, obtém-se o elo fusível de 12K, ou seja, tem como resultado uma tipologia de elo de atuação rápida.

3.4 Proteção de uma subestação particular

Esse tópico terá como referência a norma NDU-002 da Energisa, e tem como resultado promover a proteção do T₅, que como mencionado representa uma subestação particular, basicamente a salvaguarda dessa região terá como dispositivos os relés de sobrecorrente, tanto o instantâneo quanto o temporizado, e também contará com TC e elos.

Levando-se em conta as características da subestação mostradas na tabela 4, apresenta-se os seguintes cálculos referentes a ela, seguindo os passos relatados na referida norma:

- 1) Essa primeira etapa consiste em dimensionar o TC, através dos dois critérios existentes: pela carga e o de curto-circuito, no segundo será utilizada a corrente simulada presente na barra 11 que tem o valor de 1,0179 kA. Sequencialmente apresenta-se os resultados obtidos através das Equações (22) e (23):

$$I_n = \frac{S}{V_1 \cdot \sqrt{3}} = \frac{500 \cdot 10^3}{13,8 \cdot 10^3 \cdot \sqrt{3}} = 20,918 \text{ (A)} \quad (22)$$

Onde:

I_n = corrente nominal do transformador

S = Potência

V_1 = Tensão de linha

$$I_p = \frac{I_{CC3\phi}}{20} = \frac{1,0179 \cdot 10^3}{20} = 50,895 \text{ (A)} \quad (23)$$

Onde:

I_p = Corrente de projeto

$I_{CC3\phi}$ = Corrente de curto-circuito trifásico

Verificando a NBR 6856 da ABNT e através dos valores encontrados, tem-se um TC usual de 60:5.

- 2) Esse passo tem como finalidade encontrar a corrente de demanda contratada e através dela obter as sobrecorrentes temporizadas de fase e de neutro, referente a função 51.

Ressaltando-se que a demanda da subestação em questão é de 400 kW, e considera-se o fator de potência 0,92 que esta presente na NDU-002, as Equações (24), (25) e (26), representam os cálculos efetuados :

$$I_{DC} = \frac{P(kW)}{V_1 * F_p * \sqrt{3}} = \frac{400 * 10^3}{13,8 * 10^3 * 0,92 * \sqrt{3}} = 18,189 \text{ (A)} \quad (24)$$

Onde:

I_{DC} = Corrente de demanda contratada

P = Potência ativa

V_1 = Tensão de linha

F_p = Fator de potência

$$I_{51} = I_{DC} * 1,25 = 22,736 \text{ (A)} \quad (25)$$

Onde:

I_{51} = Sobrecorrente temporizada de fase

I_{DC} = Corrente de demanda contratada

$$I_{51N} = I_{51} * 0,20 = 4,547 \text{ (A)} \quad (26)$$

Onde:

I_{51N} = Corrente teporizada de neutro

I_{51} = Sobrecorrente temporizada de fase

3) Essa fase tem como objetivo encontrar a corrente de magnetização do transformador, tendo como base a NDU-002, existem duas formas existentes de encontrá-la que são: a *Inrush* parcial e a *Inrush* real. As expressões (27) e (28) remetem a obtenção dessas duas grandezas respectivamente, em seguida mostra-se a equação (29) que fornece a *Inrush* de neutro:

$$I_{NRUSH \text{ PARCIAL}} = 10 * I_n = 209,18 \text{ (A)} \quad (27)$$

Onde:

$I_{NRUSH \text{ PARCIAL}}$ = Corrente de magnetização parcial do trafo

I_n = corrente nominal do transformador

$$I_{NRUSH \text{ REAL}} = \frac{1}{\frac{1}{I_{NRUSH \text{ PARCIAL}}} + \frac{1}{I_{CC3\phi}}} = 173,521 \text{ (A)} \quad (28)$$

$I_{NRUSH \text{ REAL}}$ = Corrente de magnetização real do trafo

$I_{NRUSH\ PARCIAL}$ = Corrente de magnetização parcial do trafo

$I_{cc3\phi}$ = Corrente de curto-circuito trifásico

$$I_{NRUSH\ NEUTRO} = 0,20 * I_{NRUSH\ REAL} = 34,704\ A \quad (29)$$

Onde

$I_{NRUSH\ NEUTRO}$ = Corrente de magnetização residual de neutro

$I_{NRUSH\ REAL}$ = Corrente de magnetização real do trafo

- 4) Esse passo visa encontrar o ajuste da função instantânea (50), de fase e de neutro, essa que é baseada na corrente inrush real. As equações (30) e (31), referem-se aos cálculos realizados:

$$I_{50} = I_{NRUSH\ REAL} * 1,10 = 190,873\ (A) \quad (30)$$

Onde:

I_{50} = Corrente instantânea de fase

$I_{NRUSH\ REAL}$ = Corrente de magnetização real do trafo

$$I_{50N} = I_{50} * 0,20 = 38,175\ (A) \quad (31)$$

Onde:

I_{50N} = Corrente instantânea de fase

I_{50} = Corrente instantânea de fase

- 5) Essa última etapa tem como foco achar o ponto ANSI do transformador, tendo como base a NDU-002, esse ponto é o máximo valor de corrente que um transformador pode suportar durante um período definido de tempo sem se danificar, isso implica que as proteções gerais de fase e neutro tem que está abaixo do valores presentes nas Equações (32) e (33):

$$I_{ANSI} = \frac{100}{z\%} * I_n = \frac{100}{4,5} * 20,918 = 464,844\ (A) \quad (32)$$

Onde:

I_{ANSI} = Corrente do ponto ANSI do trafo

I_n = corrente nominal do transformador

$$I_{NANSI} = 0,58 * I_{ANSI} = 269,609\ (A) \quad (33)$$

Onde:

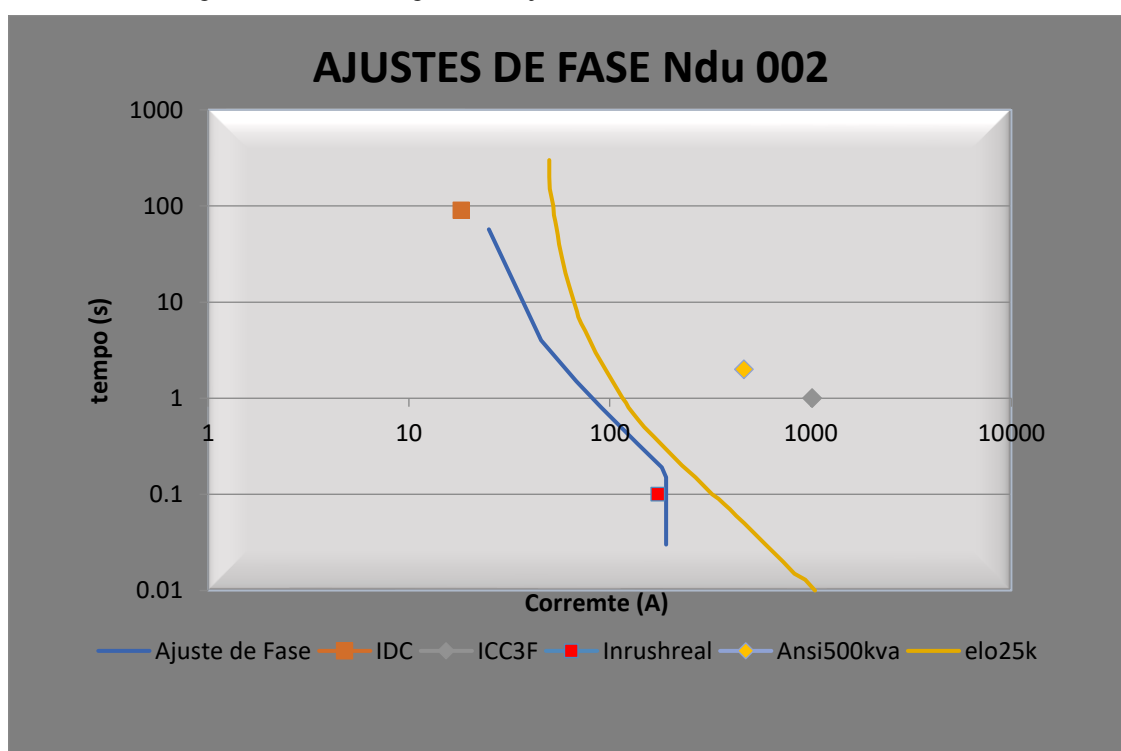
I_{ANSI} = Corrente do ponto NANSI

I_{ANSI} = Corrente do ponto ANSI do trafo

O elo fusível é obtido através da tabela 3 referente a transformadores trifásicos contida na NDU-002, verificando a capacidade do trafo e de tensão da subestação nela, tem-se que o elo propício é o de 25K.

Em seguida procurou-se plotar o coordenograma dos dispositivos de proteção da subestação, esse que é um gráfico logarítmico de tempo (eixo y) por corrente (eixo x). Essa tipologia gráfica será plotada para fase e também para o neutro. Relevante mencionar que será retradada a curva extremamente inversa e para os cálculos será utilizado a equação 1 e os dados da tabela 1, salientando-se que o dial adotado é de 0,15. A Figura 25, refere-se ao coordenograma de fase:

Figura 25 – Coordenograma do ajuste de fase de acordo com a NDU-002.



Fonte: Próprio Autor.

Os resultados obtidos no coordenograma, está organizado com clareza na tabela 9:

Tabela 9: Parâmetros expostos no coordenograma de fase.

Inrushreal	173,521 A
IDC	18,189 A
IAnsi	464,844 A
ICC3ø	1017,9 A

Fonte: Próprio Autor.

Em seguida apresenta-se a Tabela 10, com as grandezas que formam o gráfico presente na figura 2:

Tabela 10: Valores das grandezas utilizadas no coordenograma de fase.

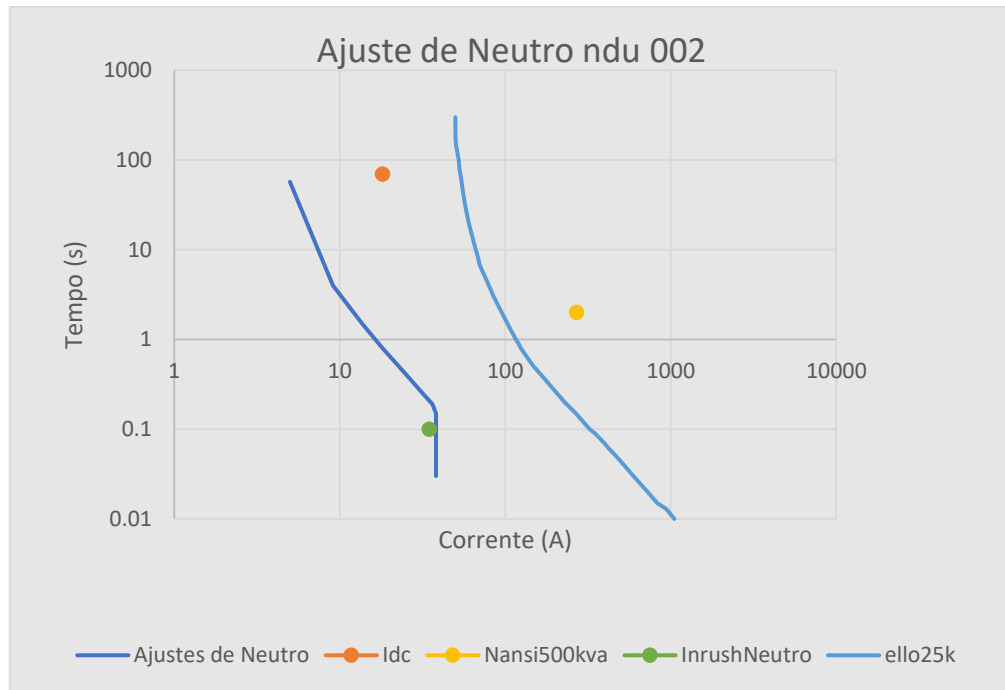
MÚLTIPLO DA CORRENTE (M)	TEMPO	CORRENTE
1,1	57,143	25,009
2	4	45,473
3	1,5	68,208
4	0,8	90,945
5	0,5	113,681
6	0,343	136,418
7	0,25	159,154
8	0,190	181,89
9	0,15	190,73
10	0,121	190,73
11	0,1	190,873
12	0,084	190,873
13	0,071	190,873
14	0,062	190,873
15	0,054	190,873
16	0,047	190,873
17	0,041	190,873
18	0,037	190,873
19	0,033	190,873
20	0,030	190,73

Fonte: Próprio Autor.

Verificando a tabela 10, tem-se que em relação ao múltiplo da corrente ocorre uma atribuição de intervalo que varia de 1,1 e que posterior a esse valor vai crescendo em um em relação ao múltiplo anterior até 20, observa-se também que a partir do múltiplo 9, o valor da corrente torna-se constante, pois nessa aferição começa a atuar a função instantânea de fase (50F).

Posteriormente a Figura 26, apresenta o coordenograma referente ao neutro da subestação em questão, os passos adotados são similares aos realizados no de fase.

Figura 26 - Coordenograma do ajuste de neutro de acordo com a NDU-002.



Fonte: Próprio Autor.

A Tabela 11 remete aos valores dos pontos visualizados no gráfico logarítmico da figura 26:

Tabela 11: Parâmetros expostos no coordenograma de neutro.

Idc	18,189 A
I_{Nansi}	269,607 A
Inrushneutro	34,704 A

Fonte: Próprio Autor.

Posteriormente é exposta a Tabela 12 com as grandezas que compõem o coordenograma de neutro:

Tabela 12: Valores das grandezas usadas no coordenograma de neutro.

MÚLTIPLO DA CORRENTE (M)	TEMPO	CORRENTE
1,1	57,143	5,002
2	4	9,095
3	1,5	13,641
4	0,8	18,189
5	0,5	22,736
6	0,343	27,283
7	0,25	31,8307

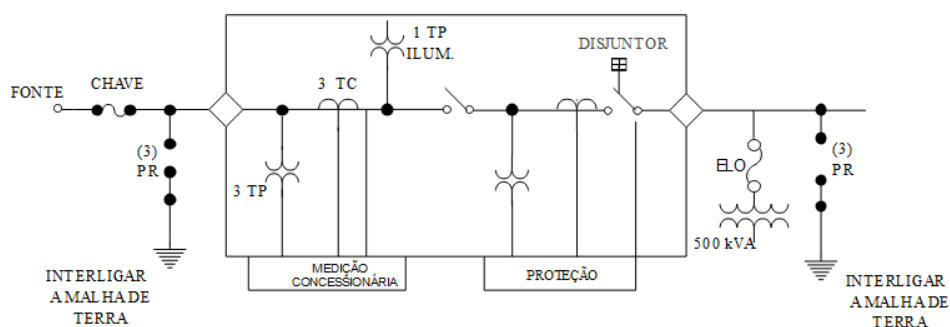
8	0,190	36,378
9	0,15	38,175
10	0,121	38,175
11	0,1	38,175
12	0,084	38,175
13	0,071	38,175
14	0,062	38,175
15	0,054	38,175
16	0,047	38,175
17	0,041	38,175
18	0,037	38,175
19	0,033	38,175
20	0,030	38,175

Fonte: Próprio Autor.

Observando-se a tabela 12, O valor da corrente torna-se constante no múltiplo 9, pois inicia-se a atuação do relé de função instantânea de neutro (50N), o que é possível ver através do comportamento gráfico, tendo em vista que o valor de corrente assume uma característica constante referente ao valor da I_{50N} encontrada.

Ademais, outro fator a ser destacado em relação a essa subestação é a explanação dos dispositivos presentes no diagrama unifilar, aparente na Figura 27:

Figura 27: Diagrama unifilar da subestação.



Fonte: Energisa NDU-002. (2019).

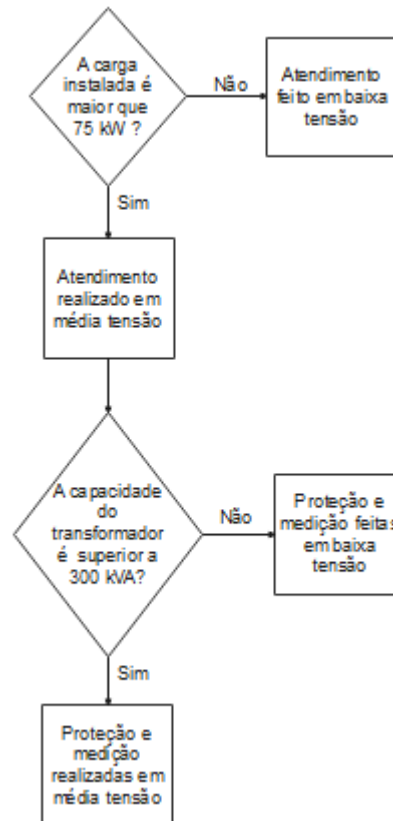
A seguir apresenta-se as funcionalidades dos componentes existentes no diagrama unifilar no sistema da subestação.

- Chave fusível de derivação: esse é o primeiro equipamento de proteção visível, tem como objetivo proteger contra sobrecorrentes em redes primárias de distribuição de energia.
- (3) PR: na imagem aparece em 3 devido ao sistema ser trifásico, basicamente destina-se a proteger o sistema contra descargas atmosféricas e sobretensões.
- 3 TP: Refere-se à três transformadores de potencial, tem como meta baixar a tensão para níveis compatíveis, com as suportadas pelos instrumentos de proteções existentes.
- 3 TC: São os três trafos de correntes existentes, tem como propósito reduzir o nível de corrente advinda da alta tensão, para possibilitar a medição e o monitoramento da corrente elétrica real que percorre em uma linha de transmissão CA.
- Medição da concessionária: visa mensurar as grandezas de tensão e corrente e demais parâmetros distribuídos no sistema.
- 1 TP serviço auxiliar: transformador auxiliar, tem como meta reduzir a tensão para alimentar serviços auxiliares como: iluminação, tomadas e nobreak.
- Chave seccionadora: Interruptor desativador que tem a capacidade de interromper a energia, para que as pessoas trabalhem de forma segura.
- Caixa de proteção: Apresenta um relé multifunção que salvaguarda o sistema contra correntes de falta de fase e neuto.
- Disjuntor: Tem como finalidade interromper a distribuição caso surja um valor superior à corrente nominal.

Importante mencionar que a chave de derivação irá fechar, e dessa forma alimentará os trafos, o relé estará ligado, porém não indicará corrente porque a chave seccionadora a princípio estará aberta, posteriormente como os seu fechamento o relé mostrará o nível de corrente, é importante destacar que durante esse processo o disjuntor estará aberto, e a chave seccionadora estará funcionando devido a tensão, portanto não tem a conexão da carga ao sistema, com o transcorrer do tempo o disjuntor será conectado ao sistema e assim a carga será interligada, pois esse equipamento de proteção tem a capacidade de extinguir o arco voltaico.

Posteriormente, realizou-se a construção do fluxograma, evidenciado na Figura 28:

Figura 28: Fluxograma.



Fonte: Próprio Autor.

As informações expressas na representação esquemática acima, foram obtidas através da NDU-002.

A Tabela 13, representa os dispositivos de proteções existentes nas regiões visualizadas na Figura 13 do Sistema elétrico estudado:

Tabela 13: Equipamentos de proteções existentes por região.

Região 1	Disjuntores e Relé de distância
Região 2	Chaves fusíveis, Elos
Região 3	Chaves Fusíveis, Elos, Relés de sobrecorrentes

Fonte: Próprio Autor.

4 Conclusões

O trabalho teve como finalidade abordar os principais dispositivos e temas que envolve a proteção de sistemas elétricos de potência, essa que é uma área de extrema importância para a manutenção e o fornecimento de energia, parcela dos assuntos que compõem esse campo da Engenharia Elétrica foram utilizados para garantir a salvaguarda do SEP em análise, sendo que as aplicabilidades relacionadas ao ordenamento da proteção da média tensão tiveram como suporte as normas de distribuição unificada do Grupo Energisa.

Destaca-se também que para a obtenção dos níveis de curto circuito, que foram essenciais para o dimensionamento dos transformadores de corrente da subtransmissão e da subestação particular, utilizou-se o ANAFAS que é uma ferramenta poderosa para analisar faltas simultâneas, esse programa que tem a sua licença concedida pelo Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (CEPEL), para a Universidade Federal do Tocantins (UFT).

Os resultados relatados a partir do estudo de caso mostraram-se satisfatórios, como por exemplo: o fornecimento de níveis de correntes adequados com a simulação, o uso do livro “Proteção de Sistemas Elétricos de Potência”, que mostrou-se relevante para garantir a salvaguarda da subtransmissão, pois com essa literatura realizou-se a efetivação dos cálculos e o detalhamento do funcionamento de um dos principais relés utilizados em linhas de transmissão que é o de distância e também a construção correta dos coordenogramas da subestação particular, com os principais pontos de sua proteção contidos.

Além disso, essa tese tem como um de seus objetivos, difundir a utilização do ANAFAS entre os discentes de engenharia elétrica da UFT, principalmente os que cursam as matérias que envolve o eixo eletrotécnico, pois contem assuntos relacionados a tónica simulada no *software*.

4.1 Trabalhos futuros

- Com relação ao sistema de distribuição, pode ser feito um estudo sobre fluxo de potência utilizando um outro programa, como o de Análise de Redes Elétricas (ANAREDE).
- Encontrar as componentes simétricas de tensão e corrente e fazer um comparativo com a simulação realizada no próprio ANAFAS, pois ele gera um relatório com essas informações.
- Analisar através de um software a verificação de harmônicos na rede de distribuição vigente.

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, A. L. V. **AJUSTE E COORDENAÇÃO DE RELÉS DE SOBRECORRENTE**. Rio de Janeiro, p. 91. 2008. Disponível em: <<http://monografias.poli.ufrj.br/monografias/monopoli10001264.pdf>> Acesso em 28 Out. 2019.
- ARAÚJO, C. A. S. et al. **PROTEÇÃO DE SISTEMAS ELÉTRICOS**. 2ª. ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2005. 266 p.
- ARAUJO, L. C. **ANÁLISE DOS IMPACTOS DA IMPLANTAÇÃO DA USINA SOLAR FOTOVOLTAICA NA UNIVERSIDADE FEDERAL DO TOCANTINS – UFT CÂMPUS PALMAS**. Palmas, p. 98. 2019. Disponível em: <[http://repositorio.uft.edu.br/bitstream/11612/1479/1/Lucas%20Cajueiro%20Araujo%20-%20TCC%20Monografia%20-%20Engenharia%20El% c3% a9trica.pdf](http://repositorio.uft.edu.br/bitstream/11612/1479/1/Lucas%20Cajueiro%20Araujo%20-%20TCC%20Monografia%20-%20Engenharia%20El%c3%a9trica.pdf)>. Acesso em: 14 Out. 2019.
- ARAÚJO, M. V. D. **RETROFIT EM PROTEÇÃO DE GERADORES: ASPECTOS QUALITATIVOS DA FUNÇÃO DE SOBREFLUXO E SUBFREQUÊNCIA**. Paulo Afonso, p. 102. 2017. Disponível em: < https://portal.ifba.edu.br/paulo-afonso/anexos/anexos-cursos/graduacao/Engenharia_Eletrica/TCC-EE/2017/tcc-michael-vital-de-araujo-2017.pdf>. Acesso em 26 Out. 2019.
- BISCARO, A. D. A. P. **INTRODUÇÃO AOS SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA**. [S.l.], p. 9. 2019. Disponível em: <http://sinop.unemat.br/site_antigo/prof/foto_p_downloads/fot_16575capitulo_01-introducao_aos_sdee_pdf_Capitulo_01-Introducao_aos_SDEE.pdf>. Acesso em: 14 out. 2019.
- CARVALHO, B. K. D. **ANÁLISE DA COORDENAÇÃO E SELETIVIDADE ENTRE RELIGADORES E CHAVES FUSÍVEIS NA REDE DEDISTRIBUIÇÃO**. Campo Grande, p. 62. 2018. Disponível em: <<http://repositorio.pgsskroton.com.br/bitstream/123456789/23664/1/BRUNO%20KAGI%20DE%20CARVALHO.pdf>>. Acesso em 05 Nov. 2019.
- CARVALHO, G. A. D. **METODOLOGIA PARA GRADUAR, PARAMETRIZAR E AVALIAR O DESEMPENHO DE UMA PROTEÇÃO DIGITAL DE DISTÂNCIA APLICADA A LINHAS DE TRANSMISSÃO**. Paulo Afonso, p. 77. 2017. Disponível em: <https://portal.ifba.edu.br/paulo-afonso/anexos/anexos-cursos/graduacao/Engenharia_Eletrica/TCC-EE/2017/tcc-gilvan-2017.pdf>. Acesso em 02 Nov. 2019.
- CASTRO, J. L. D. S. **ANÁLISE DE COORDENAÇÃO E PROTEÇÃO ELÉTRICA DE ALIMENTADORES DE DISTRIBUIÇÃO INSTALADOS EM ÁREA RURAL**. Santa Rosa, p. 74. 2016. Disponível em: <[http://bibliodigital.unijui.edu.br:8080/xmlui/bitstream/handle/123456789/4122/Jorge%20Lu% C3% ADs% 20da% 20Silva% 20Castro.pdf?sequence=1](http://bibliodigital.unijui.edu.br:8080/xmlui/bitstream/handle/123456789/4122/Jorge%20Lu%C3%ADs%20da%20Silva%20Castro.pdf?sequence=1)>. Acesso em: 17 Out.2019.

COTOSCK, K. R. **PROTEÇÃO DE SISTEMAS ELÉTRICOS: UMA ABORDAGEM TÉCNICO-PEDAGÓGICA**. Belo Horizonte, p. 109. 2007.

Disponível em: <https://repositorio.ufmg.br/bitstream/1843/BUOS-8CZLET/1/kelly_regina_cotosckf.pdf>. Acesso em : 21 Out. 2019.

CREDER, H. **INSTALAÇÕES ELÉTRICAS**. 16^a. ed. São Paulo: LTC, 2018. 459 p.

DECOURT, P. C. K. **FACILIDADE DO PROGRAMA ANAFAS PARA ESTUDO DE CURTO-CIRCUITO E PROTEÇÃO DE SISTEMAS DE ENERGIA ELÉTRICA**. Rio de Janeiro, p. 106. 2007. Disponível em:

<<http://monografias.poli.ufrj.br/monografias/monopoli10001383.pdf>> Acesso em 24 Nov. 2019.

FELBER, L. A. **REGULAÇÃO DE TENSÃO EM SUBESTAÇÕES DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA**. Itajúba, p. 123. 2010. Disponível em:

<<http://livros01.livrosgratis.com.br/cp140949.pdf>>. Acesso em 04 Out. 2019.

FERREIRA, D. A. P. **ANÁLISE DE FALHAS EM TRANSFORMADORES DE DISTRIBUIÇÃO POR METODOLOGIA FORENSE**. São Carlos, p. 118. 2013.

Disponível em: <<https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18154/tde-31102013-081243/publico/Daniel.pdf>>. Acesso em 10 Nov. 2019.

FILHO, J. D. S. V. **COORDENAÇÃO E SELETIVIDADE DA PROTEÇÃO ELÉTRICA DO TERMINAL PORTUÁRIO DO PECÉM COM A ENTRADA DA CARGA DA CORREIA TRANSPORTADORA**. Fortaleza, p. 73. 2010. Disponível em:

<<http://www.dee.ufc.br/anexos/TCCs/2010.2/JOSEMAR%20DE%20SOUSA%20VIA%20FILHO.pdf>>. Acesso em: 21 Out.2019.

FILHO, J. M. **MANUAL DE EQUIPAMENTOS ELÉTRICOS**. 4^a. ed. São Paulo: LTC, 2018. 665 p.

FILHO, J. M.; MAMEDE, D. R. **SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA**. 1^a. ed. São Paulo: LTC, 2017. 601 p.

FILHO, J. M; MAMEDE, D. R. **PROTEÇÃO DE SISTEMAS ELÉTRICOS**. 1^a. ed. São Paulo: LTC, 2013.605 p.

GAIO, E. D. **PROPOSTA DE UM PLANO DE MANUTENÇÃO DE UM EQUIPAMENTO INDUSTRIAL ATRAVÉS DA UTILIZAÇÃO DE FERRAMENTAS DA MANUTENÇÃO CENTRADA EM CONFIABILIDADE**.

Juiz de Fora, p. 64. 2016. Disponível em:

<<http://www.ufjf.br/mecanica/files/2016/07/Monografia-FINAL-Revisada.-8-12-16Evandro-Gaio.pdf>>. Acesso em: 18 Out.2019.

GOMES, N. O. N. **ANÁLISE DE FALTAS SIMULTÂNEAS NO SISTEMA ELÉTRICO DE POTÊNCIA DE 57 BARRAS ATRAVÉS DO SOFTWARE ANAFAS**. Brasília, p. 109. 2018. Disponível em:

<<https://repositorio.uniceub.br/jspui/handle/prefix/12760>>. Acesso em 24 Nov. 2019.

HOROWITZ, S. H.; PHADKE, A. G. **POWER SYSTEM RELAYING**. 4ª. ed. [S.l.]: WILEY, 2014. 381 p.

JUNIOR, E. R. **VIABILIDADE TÉCNICA E ECONÔMICA DA MODERNIZAÇÃO DO SISTEMA DE PROTEÇÃO DA DISTRIBUIÇÃO**. São

Paulo, p. 202. 2006. Disponível em:

<<https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3143/tde-11122006-143845/publico/EloiRufatoJunior.pdf>>. Acesso em 26 Out. 2019.

JUNIOR, G. M. **DISPOSITIVOS DE PROTEÇÃO CONCEITOS BÁSICOS E APLICAÇÕES**. [S.l.], p. 31. 2013. Disponível em:

<https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/4707109/mod_resource/content/1/dispositivos_protecao.pdf>. Acesso em: 04 Out. 2019.

KAGAN, N.; OLIVEIRA, C. C. B. D.; ROBBA, E. J. **INTRODUÇÃO AOS SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA**. 2ª. ed. São Paulo: Blucher, 2010. 325 p.

KINDERMANN, G. **PROTEÇÃO DE SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA**.

2ª. ed. Florianópolis-SC: LabPlan, v. 2, 2006.

LEDESMA, J. J. G. **UMA METODOLOGIA PARA ANÁLISE DA COORDENAÇÃO E SELETIVIDADE DA PROTEÇÃO DE SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO**. Juiz de Fora, p. 156. 2012. Disponível em:

<http://www.ufjf.br/ppee/files/2012/02/Disserta%C3%A7%C3%A3o_Jorge_Javier_Gimenez_Ledesma.pdf>. Acesso em: 21 Out. 2019.

LUCENA, L. M. F. D. **ESTUDO DE CASO DOS CRITÉRIOS DE COORDENAÇÃO E SELETIVIDADE DA PROTEÇÃO DE UM SISTEMA INDUSTRIAL**. João Pessoa, p. 58. 2017. Disponível em:

<http://www.cear.ufpb.br/arquivos/cgee/TCC/TCC_-_L%C3%AAda_Lucena_-_vers%C3%A3o_final.pdf> Acesso em 24 Nov. 2019.

MARTINS, D. L. **ESTUDO DE CASO NA AUTOMAÇÃO, PROTEÇÃO E SUPERVISÃO DE UMA SUBESTAÇÃO DE CLASSE 69KV**. São carlos, p. 77. 2012.

<<http://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:iRkvkLiUFqsJ:www.tcc.sc.usp.br/tce/disponiveis/18/180500/tce-31012013-145629/%3F%26lang%3Dbr+%&cd=1&hl=pt-BR&ct=clnk&gl=br>>. Acesso em 28 Out. 2019.

MESQUITA, M. M. **PROJETO DE UM TRANSFORMADOR DE DISTRIBUIÇÃO TRIFÁSICO DIMENSIONAMENTO, PERDAS E DETERMINAÇÃO DA SUA CORRENTE INRUSH**. Palmas, p. 60. 2019.

Disponível em:

<<https://repositorio.uft.edu.br/bitstream/11612/1438/1/Mateus%20Mesquita%20-%20TCC%20Monografia%20-%20Engenharia%20El%C3%A9trica.pdf>> Acesso em 25 Nov. 2019.

MOMESSO, A. E. C. **PROTEÇÃO ADAPTATIVA DE RELÉS DE SOBRECORRENTE COM LÓGICA FUZZY**. São Carlos, p. 135. 2017. Disponível

em: <<https://teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18154/tde-17082017-144237/publico/Antonio.pdf>>. Acesso em 26 Out. 2019.

OLIVEIRA, M. L. D. PLANEJAMENTO INTEGRADO DA EXPANSÃO DE SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA. Campinas, p. 199. 2010. Disponível em: <http://repositorio.unicamp.br/bitstream/REPOSIP/260639/1/Oliveira_MarinaLavoratode_D.pdf>. Acesso em: 08 Out. 2019.

PHADKE, A. G.; THORP, J. S. COMPUTER RELAYING FOR POWER SYSTEMS. 2ª. ed. West Sussex: WILEY, 2009. 344 p.

SAMPAIO, A. L. P. CONSOLIDAÇÃO DE MATERIAL DIDÁTICO PARA A DISCIPLINA DE EQUIPAMENTOS ELÉTRICOS – DISJUNTORES. Rio de Janeiro, p. 123. 2012. Disponível em : <<http://www.dee.ufrj.br/~acsl/grad/equipamentos/TCC%20Andre%20Lawson%20-%20Versa%CC%83o%20Final.pdf>>. Acesso em 02 Nov. 2019.

SANHUEZA, S. M. R. et al. ANALYSIS AND EVALUATION OF RESIDENTIAL AIR CONDITIONERS FOR POWER SYSTEM STUDIES. [S.l.], p. 10. 2007. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/3267836_Analysis_and_Evaluation_of_Residential_Air_Conditioners_for_Power_System_Studies>. Acesso em: 04 Out. 2019.

SANTOS, A. M. D. AUTOMAÇÃO DE SUBESTAÇÕES. Ouro Preto, p. 38. 2018. Disponível em: <https://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:0iGnm25zlvYJ:https://www.monografias.ufop.br/bitstream/35400000/1354/1/MONOGRAFIA_Automa%25C3%25A7%25C3%25A3oSubesta%25C3%25A7%25C3%25B5es.pdf+&cd=2&hl=pt-BR&ct=clnk&gl=br> Acesso em 26 Out. 2019.

SANTOS, S. P. D. TECNOLOGIA EM RELIGAMENTO DE REDES DE Itatiba, p. 31. 2012. Disponível em: <<http://lyceumonline.usf.edu.br/salavirtual/documentos/2368.pdf>>. Acesso em 10 Nov. 2019.

SATO, F.; FREITAS, W. ANÁLISE DE CURTO-CIRCUITO E PRINCÍPIOS DE PROTEÇÃO EM SISTEMAS DE ENERGIA ELÉTRICA. Rio de Janeiro: ELSEVIER, 2015. 472 p.

SILVA, D. F. D.; MING, L. Y.; ALMEIDA, P. H. D. SISTEMA DE PROTEÇÃO ATRAVÉS DO USO DE RELÉS MICROPROCESSADOS PARA SUBESTAÇÕES ELÉTRICAS DE ALTA TENSÃO PADRÃO COPEL. Curitiba, p. 155. 2014. Disponível em: <https://www.protcom.net/Literatura/Protecao/Distribuicao/MONOGRAFIAS/2014_SISTEMA%20PROTE%20C3%87%20C3%83O%20SUBESTA%20C3%87%20C3%95ES%20ALTA%20TENS%20C3%83O.pdf>. Acesso em 26 Out. 2019.

SILVA, D. L. D.; SILVA, D. L. D. AJUSTES, SELETIVIDADE E COORDENAÇÃO ÓTIMA ENTRE DISPOSITIVOS DE PROTEÇÃO DE

REDES DE DISTRIBUIÇÃO CONSIDERANDO SUAS CARACTERÍSTICAS DE TEMPO INVERSO POR MEIO DE ALGORITMOS GENÉTICOS. Tucuruí, p. 112. 2012. Disponível em: <https://www.protcom.net/Literatura/Protecao/Redes/MONOGRAFIAS/2012_AJUSTE%20SELETIVIDADE%20COORDENA%20C3%87%20C3%83O%20PROTE%20C3%87%20C3%83O_REDES%20DISTRIBUI%20C3%87%20C3%83O.pdf> Acesso em: 02 Nov 2019.

SILVA, L. G. W. D. “ALOCAÇÃO OTIMIZADA DE DISPOSITIVOS DE PROTEÇÃO EM SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA”.

Ilha Solteira , p. 89. 2002. Disponível em:

<https://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/87280/silva_lgw_me_ilha.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 05 Nov. 2019.

SILVA, M. G. M. AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO DE RELÉS DE PROTEÇÃO DIGITAIS. Rio de Janeiro, p. 102. 2012. Disponível em:

<<http://monografias.poli.ufrj.br/monografias/monopoli10005149.pdf>> Acesso em: 21 Out. 2019.

VIANA, M. P. ESTUDO COMPARATIVO DA PROTEÇÃO DA REDE SECUNDÁRIA DE UMA DISTRIBUIDORA DE ENERGIA ELÉTRICA UTILIZANDO CHAVE FUSÍVEL E SECCIONALIZADOR MONOFÁSICO.

Guaratinguetá, p. 49. 2015. Disponível em:

<<https://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/139269/000864929.pdf?sequence=1>>. Acesso em: 02 Nov. 2019.

ENERGISA, NORMA DE DISTRIBUIÇÃO UNIFICADA – NDU 002. Fornecimento de Energia Elétrica em Tensão Primária. Revisão 5.2 Junho/2019.

ENERGISA, NORMA DE DISTRIBUIÇÃO UNIFICADA – NDU 006. Critérios Básicos para Elaboração de Projetos de Redes de Distribuição Aéreas Urbanas. Revisão 5.0 Agosto/2018.